

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University
Université Badji Mokhtar –
Annaba
Faculté de Technologie



جامعة باجي مختار – عنابة

كلية التكنولوجيا

Département Génie Mécanique

قسم الهندسة الميكانيكية

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat En-Sciences

Spécialité : Génie Mécanique

Par :

TAAMALLAH Ouahiba

Thème :

Effets des caractéristiques de surface induites par le brunissage sur la tenue en fatigue de l'acier 100C6

Thèse soutenue le 15/02/2026 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	Mokas Nacer	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
02	Hamadache Hamid	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
03	Tourab Mohamed	Prof.	Université M'hamed Bougara Boumerdes	Examineur
03	Belhadi Salim	Prof.	Université 8 Mai 1945 _ Guelma	Examineur
04	Gharbi Fathi	MCA	Institut supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Kairouan, Tunisie	Examineur
05	Benchiheb Slimane	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur

تأثير خصائص السطح الناتجة عن عملية التدميك على مقاومة الكلال للفولاذ "100C6"

الملخص:

تتناول هذه الأطروحة تحليل تأثير التدميك على خصائص السطح لفولاذ 100C6، وتركز بشكل خاص على خشونة، والصلادة، ومقاومة الكلال، والجهود المتبقية. يُعتبر التدميك أحد المعالجات الميكانيكية السطحية، ويُعرف بفعاليته في تحسين سلامة السطح، وهو أمر بالغ الأهمية لضمان متانة وموثوقية المواد في ظروف التشغيل القاسية. تم إجراء التجارب وفق خطة عاملية كاملة من نوع Taguchi بهدف تحسين معلمات التدميك. وقد تم تحديد النظام الأمثل باستخدام مقاربة المرغوبية متعددة الأهداف، والتمثل في: عدد تمريرات $i = 3$ ، سرعة تقدم $f = 0.074 \text{ mm/tr}$ ، وجهد التدميك $P_y = 10 \text{ kgf}$. أدت هذه الإعدادات إلى تحقيق أفضل خشونة سطحية (0.123 ميكرومتر) وأعلى صلادة (585.07 وحدة Vickers)، مما ساهم في تقليل التعرجات السطحية وتحسين مقاومة الكلال، حيث بلغت المكاسب في عدد دورات الكسر 120% و 12.57% في مجال منخفض عدد الدورات ومجال مرتفع عدد الدورات على التوالي. كشفت التحاليل الكسرية عن أشكال كسر تحتوي على تجاوز مميّزة للكسر اللدن، إضافةً إلى متانة أعلى للعينات المصقولة، حيث شغلت منطقة التشقق 75% من المساحة الكلية لمقاطع الكسر. أما بالنسبة للجهود المتبقية، فقد تسبب التدميك في توليد حالة انضغاط في الطبقات السطحية، وهي حالة معروفة بتأثيرها في إغلاق الشقوق وتأخير انتشارها، ما يُسهم بدون شك في إطالة عمر المادة. كما لوحظ أن شدة الإجهادات المتبقية تتغير بتغير حمولة الاختراق، حيث سُجلت أكبر زيادة بنسبة 5.31% عند حمولة اختراق قدرها 1.5 نيوتن.

الكلمات المفتاحية: التدميك، الفولاذ 100C6 خشونة السطح، الصلادة، الكلال، الإجهادات المتبقية.

« Effets des caractéristiques de surface induites par le brunissage sur la tenue en fatigue de l'acier 100C6 »

Résumé :

Cette thèse analyse l'impact du brunissage sur les propriétés de surface de l'acier 100C6, en particulier sur la rugosité, la dureté, la résistance à la fatigue et les contraintes résiduelles. Le brunissage, un traitement mécanique de surface (TMS), est reconnu pour son efficacité à améliorer l'intégrité de surface des matériaux, ce qui est essentiel pour leur durabilité et leur fiabilité dans des conditions de travail sévères. Les expériences ont été menées selon un plan factoriel complet de type Taguchi pour optimiser les paramètres du brunissage : un nombre de passes $i = 3$, une vitesse d'avance $f = 0,074$ mm/tr et un effort de brunissage $P_y = 10$ kgf. Cette configuration a permis d'atteindre la meilleure rugosité de surface ($0,123 \mu\text{m}$) et la dureté maximale ($585,07$ HV), contribuant ainsi à une réduction des irrégularités de surface et à une amélioration de la résistance à la fatigue où les gains sur les nombres de cycles à rupture ont atteint 120 % et 12,57% dans le domaine oligocyclique et à grand nombre de cycles successivement. L'analyse fractographique a révélé des faciès de rupture qui renferment des cupules caractéristiques d'une rupture ductile et une plus grande ténacité des échantillons brunis dont la surface fissurée a occupé 75% de l'aire totale des éprouvettes rompues. Concernant les contraintes résiduelles, le brunissage a induit un état de compression dans les couches superficielles reconnu pour ses effets de fermeture et retard de la propagation des fissures qui sans doute contribuent à augmenter la durée de vie globale du matériau. L'intensité des contraintes résiduelles semble évoluer avec la charge d'indentation. Ainsi pour des charges d'indentation de 1.5 N, les contraintes résiduelles induites par le brunissage ont vu la plus grande augmentation de 5.31%.

Mots clés : Brunissage, acier 100C6, rugosité de surface, dureté, fatigue, contraintes résiduelles.

« Effects of Surface Characteristics Induced by Burnishing on the Fatigue Performance of 100C6 Steel »

Abstract:

This thesis analyzes the impact of burnishing on the surface properties of 100C6 steel, particularly focusing on surface roughness, hardness, fatigue resistance, and residual stresses. Burnishing, a mechanical surface treatment (MST), is known for its effectiveness in enhancing the surface integrity of materials, which is essential for their durability and reliability under severe working conditions. The experiments were conducted using a full factorial design of the Taguchi type to optimize the burnishing parameters. The optimal regime was determined using a multi-objective desirability approach and corresponds to the following parameters: number of passes (i) = 3, feed rate (f) = 0.074 mm/rev, and burnishing force (P_y) = 10 kgf. This configuration yielded the best surface roughness (0.123 μm) and the highest hardness (585.07 HV), contributing to reduced surface irregularities and enhanced fatigue resistance. The gains in the number of cycles to failure reached 120% and 12.57% in the low-cycle and high-cycle fatigue domains, respectively. Fractographic analysis revealed fracture surfaces with dimples characteristic of ductile failure, indicating greater toughness in the burnished specimens, where the cracked surface accounted for 75% of the total fracture area. Regarding residual stresses, burnishing induced a compressive state in the surface layers, which is known for its effects in crack closure and delay of crack propagation, thus contributing to the overall extension of the material's service life. The intensity of residual stresses appeared to vary with the indentation load. For an indentation load of 1.5 N, the residual stresses induced by burnishing showed the highest increase of 5.31%.

Keywords: Burnishing, 100C6 steel, surface roughness, hardness, fatigue, residual stresses.

Remerciements

La concrétisation de ce travail n'aurait pas été possible sans l'apport précieux de nombreuses personnes, auxquelles j'exprime ma profonde reconnaissance.

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur **Hamadache Hamid**, du département de Mécanique de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba. Son accompagnement, son soutien constant et la confiance qu'il m'a accordée ont été déterminants dans l'aboutissement de cette recherche. Sa disponibilité et ses conseils avisés ont grandement contribué à l'orientation de ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements au président du jury, Professeur **Mokas Nacer**, Université Badji Mokhtar – Annaba, pour son autorité et son évaluation rigoureuse, ainsi qu'aux membres du jury : Professeur **Tourab Mohamed**, Université M'hamed Bougara – Boumerdes, pour la qualité et la pertinence de ses observations ; Professeur **Belhadi Salim**, Université 8 Mai 1945 – Guelma, pour ses remarques constructives et éclairantes ; Monsieur **Gharbi Fathi**, Institut supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Kairouan – Tunisie, pour ses conseils avisés et son engagement dans l'évaluation ; et Monsieur **Benchiheb Slimane**, Université Badji Mokhtar – Annaba, pour son soutien et ses commentaires enrichissants. Leur intérêt pour cette recherche et la qualité de leurs remarques ont contribué de manière significative à l'enrichissement de ce manuscrit.

Ma gratitude va également à Monsieur **Phamdonhat Quang**, docteur et concepteur mécanique, pour ses conseils judicieux et son soutien, qui m'ont été d'un grand appui au cours de ce travail.

Au sein du **LRTAPM**, j'ai eu le privilège de collaborer avec des enseignants, chercheurs et techniciens dont le soutien et les échanges ont enrichi ce travail. Je leur en suis profondément reconnaissant, ainsi qu'aux membres de l'unité **URASM** pour leur aide et leur expertise.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au personnel du laboratoire de mécanique du Département de Métallurgie de l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, ainsi qu'à l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie d'Annaba (**ENSTI**) pour leur collaboration et leur disponibilité constante.

Enfin, je voudrais exprimer ma profonde gratitude envers ma mère, ma famille, mes frères et sœurs, dont l'amour et le soutien inébranlables ont été une force essentielle tout au long de ce parcours. Un immense merci à mes collègues et amis, qui ont apporté leur soutien et partagé cette expérience avec moi. À toutes celles et ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à cette recherche, je témoigne ma reconnaissance la plus sincère. Leur bienveillance et leurs encouragements ont été une source précieuse de motivation.

DÉDICACES

À ma mère,

À mes très chers frères et sœurs « A.Elhafid, AbdeNacer, Ramdane Djamila et Soued »,

Cette thèse vous est dédiée en témoignage de ma profonde gratitude pour votre amour sans faille, votre soutien précieux et vos encouragements constants. À chaque étape de mon parcours, vous avez été ma force, ma motivation et mon refuge. Votre confiance en moi, même dans les moments de doute, m'a porté et m'a permis d'aller au bout de cet accomplissement. Ce travail est autant le vôtre que le mien, car sans vous, rien n'aurait été possible.

À mes nièces et neveux

Vous êtes une source inestimable de joie et d'inspiration. Vos sourires, votre insouciance et votre énergie m'ont apporté du réconfort dans les moments difficiles. J'espère que ce chemin parcouru vous rappellera que tout est possible avec de la détermination et du travail. Que ce modeste accomplissement soit pour vous une preuve que les rêves peuvent devenir réalité.

À l'âme de mon père,

À l'âme de mes chers frères Rachid et Salah,

Votre absence est une blessure que le temps ne peut guérir, mais votre présence demeure gravée en moi à chaque instant. Papa, ton amour et tes valeurs continuent de me guider. Rachid, tu as été un second père, un pilier sur lequel je me suis toujours appuyé. Salah, notre complicité et notre lien profond restent vivants en moi. Cette thèse est un hommage à tout ce que vous avez été pour moi, à tout ce que vous m'avez transmis.

À l'âme de ma sœur Naïma, ma moitié,

Plus qu'une sœur, tu es une part de moi. Ton amour, ton soutien et ta présence inconditionnelle ont été ma lumière dans les moments sombres et ma force dans les épreuves. Sans toi, ce chemin aurait été bien plus difficile. Cette réussite est aussi la tienne, car tu as toujours été là, à mes côtés, avec une bienveillance et un amour infini.

Introduction générale	19
<i>Chapitre I : Recherches Bibliographiques</i>	
I.1. Introduction.....	22
I.2. Les aciers : élaborations et mise en œuvre.....	22
I.2.1. Généralité sur les aciers.....	22
I.2.2. Historique de l'acier	22
I.2.3. Fabrication de l'acier	23
I.2.4. Mise en œuvre des aciers	23
I.2.5. État de l'Art sur l'Usinabilité de l'Acier 100C6	23
I.3. L'intégrité de surface.....	25
I.3.1. Intérêt de la Finition de surface.....	25
I.3.2. L'état géométrique.....	26
I.3.3. L'état physique	28
I.4. La fatigue.....	32
I.4.1. Généralité et définition.....	32
I.4.1.1. Amorçage et propagation de fissures de fatigue.....	34
I.4.2. Processus et Mécanismes	35
I.4.2.1. Courbe de wholer	36
I.4.3. Les influences	37
I.5. Traitements mécaniques de surface	38
I.5.1. Définition et Principe.....	38
I.5.1.1. Définition du brunissage et Applications	39
I.5.1.2. Définition du brunissage à la bille	39
I.5.1.3. Définition et principe du brunissage par glissement (SB).....	40
I.5.2. Classification des méthodes de brunissage	41
I.5.3. Mécanismes d'action du brunissage sur l'intégrité de surface	41
I.5.3.1. Mécanisme d'amélioration de la rugosité par brunissage.	42
I.5.3.2. Mécanisme d'écaillage et évolution de la dureté	43
I.5.3.3. Génération des contraintes résiduelles par déformation plastique.....	43
I.5.3.4. Effet des paramètres du brunissage	43
I.5.3.5. Mécanisme d'amélioration de la tenue en fatigue.....	44
I.5.4. Types des outils	44
I.5.4.1. Outil à Réglage par Ressort	45
I.5.4.2. Brunissage Assisté par Vibrations Ultrasoniques (UVABB)	45
I.5.5. Les paramètres clés du brunissage.....	47
I.5.6. Modélisation et optimisation des paramètres du brunissage	47

I.6. Etat d'art sur le brunissage.....	48
I.6.1. Travaux antérieurs sur l'amélioration de l'intégrité de surface par brunissage	48
I.6.2. Résultats expérimentaux rapportés dans la littérature.....	48
I.6.2.1. Études publiées sur l'évolution de la rugosité.....	48
I.6.2.2. Études publiées sur l'évolution de la dureté.... Erreur ! Signet non défini.	
I.6.2.3. Résultats expérimentaux sur les contraintes résiduelles.....	50
I.6.2.4. Influences des paramètres du Brunissage sur les propriétés de surface.	51
I.6.3. Effet du brunissage sur les Propriétés Mécaniques.....	53
I.6.3.1. Études bibliographiques sur la tenue en fatigue.....	53
I.6.4. Optimisation du brunissage par méthodes expérimentales et numériques..	54
I.7. Conclusion.....	55
 <i>Chapitre II : Matériau et Techniques Expérimentales</i>	
II.1. Introduction.....	57
II.2. Matériau et techniques expérimentales.....	59
II.2.1. Matériau.....	59
II.2.2. Microstructure.....	59
II.3. Mesure de la rugosité de la surface.....	60
II.4. Mesure de la dureté.....	61
II.5. Méthodologie de surface de réponse (MSR).....	62
II.6. Préparation des éprouvettes avant analyse des faciès de rupture Erreur ! Signet non défini.	
II.7. Mesure des contraintes résiduelles.....	64
II.8. Procédé de brunissage.....	65
II.9. Essais de Fatigue.....	68
II.10. Analyse microscopique des surfaces de rupture.....	69
II.11. Conclusion.....	70
 <i>Chapitre III : Optimisation des Paramètres du SDB</i>	
III.1. Introduction.....	72
III.2. Effets du SDB sur l'intégrité de surface.....	72
III.2.1. Effet sur la rugosité.....	72
III.2.2. Effet sur la dureté.....	74

III.3. Analyses statistiques et modèles mathématiques	75
III.3.1. Coefficient de corrélation R^2 :	76
III.3.2. Coefficient de corrélation ajusté $R^2_{ajusté}$ (R^2) :	76
III.3.3. Analyse de la variance (ANOVA) :	76
III.4. Analyse de la variance pour la rugosité	78
III.4.1. Modèle mathématique.....	78
III.4.2. Paramètres du SDB et Interactions sur R_a.....	80
III.4.3. Analyse de la variances Multivariée de la rugosité	82
III.4.3.1. Carte Multivariée de la Rugosité.	82
III.4.3.2. Contributions des Paramètres et de leurs Interactions sur R_a	84
III.5. Analyse de la Variance de la dureté H_v	85
III.5.1. Modèle mathématique.....	85
III.5.2. Paramètres du SDB et Interactions sur H_v.....	87
III.5.3. Analyse de la variance Multivariée de H_v.....	89
III.5.3.1. Carte Multivariée de H_v.	89
III.5.3.2. Contributions des Paramètres et de leurs Interactions sur H_v	91
III.6. Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité	92
III.6.1. Introduction	92
III.6.2. Approche Multi-objective pour le Régime Optimal en Brunissage	
III.7. Conclusion	95
 <i>Chapitre IV : Tenue en Fatigue et des Contraintes Résiduelles induites par le SDB</i>	
IV.1. Introduction	98
IV.2. Effet du SDB sur les contraintes résiduelles	98
IV.3. Technique d'évaluation des contraintes résiduelles	99
IV.4. Résultats et discussions	103
IV.4.1 Courbes d'indentation.....	103
IV.4.2. Influence de F_{max} sur la profondeur de pénétration.....	105

IV.4.3. Influence du brunissage sur la nanodurété	105
IV.4.4. Influence du brunissage sur les contraintes résiduelles	106
IV.5. Influence du brunissage sur la tenue en fatigue	107
IV.5.1. Introduction	107
IV.5.2. Effet du SDB sur la durée de vie	108
IV.6. Analyse fractographique.....	109
IV.6.1. Évolution des fronts de rupture.....	115
IV.7. Conclusion	116
Conclusion générale	119
Références	121

Liste des figures

Figure I.1. a) Variation de l'effort de coupe primaire (F_c) et de la rugosité de surface (R_a), b) en fonction de la température et du nombre de revenus répétées [177].....	23
Figure I.2. a) Effet de la profondeur de coupe et de la vitesse de coupe sur la force d'avance F_x , b) et effet du rayon du bec de l'outil et de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface R_a [180].....	24
Figure I.3. Schéma des différentes couches affectées par un procédé de fabrication [40].	25
Figure I.4. Classement morphologique DIN 4760:1982	27
Figure I.5. Défauts de surface	27
Figure I.6. Rugosité moyenne arithmétique.....	28
Figure I.7. Définitions des différents domaines de dureté	30
Figure I.8. Représentation des différents ordres de contraintes résiduelles en fonction de l'échelle d'observation.....	31
Figure I.9. Représentation et définition d'une sollicitation cyclique quelconque.....	33
Figure I.10. Classification des différents types de sollicitation en fatigue avec rapport de contrainte R_σ correspondant.....	34
Figure I.11. Représentation des différents stades de propagation d'une fissure courte. [70]	35
Figure I.12. Représentation des différents stades de propagation d'une fissure longue, dans le cas de la mécanique linéaire élastique de rupture	36
Figure I.13. Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue.....	37
Figure I.14. Lissage des aspérités usinées par déformation plastique pendant le traitement mécanique de surface (TMS)	39
Figure I.15. Principe de bruissage à bille	40
Figure I.16. Principe du brunissage par glissement	41
Figure I.17. Schémas des méthodes de brunissage	42
Figure I.18. Dispositifs de brunissage avec réglage à ressort. a) Dispositif à têtes interchangeable avec précharge réglable par ressort, b) Outil avec réglage de l'inclinaison et de la force de brunissage à l'aide d'un ressort.	45

Figure I.19.: (a). Vue d'ensemble d'un processus de brunissage à billes assisté par vibration. (b). Composantes de la force de de la force de brunissage (F_b).	46
Figure I.20. Effet du brunissage par ultrasons par vibration sur la rugosité : a) Les parties en bleu montrent la rugosité moyenne, b) Les barres orange représentent la rugosité totale.....	46
Figure I.21. Outil de brunissage à bille UVABB avec système de déplacement linéaire 1D : (a) Schéma du système piézoélectrique ; (b) Prototype utilisé pour le suivi des vibrations	47
Figure I.22. Images de surfaces tournées et brunies.....	49
Figure I.23. Profils 3D des surfaces préliminaires et brunies à $F_t = 20$ et 80 N : Lissage des irrégularités à $F_t = 20$ N et apparition d'irrégularités périodiques à $F_t = 80$ N.	49
Figure I.24. Effet du traitement mécanique sur : (a) la rugosité et (b) la dureté	50
Figure I.25. Distribution des contraintes résiduelles obtenue par analyse de contraintes par diffraction des rayons X de de l'acier AISI 316Ti.	51
Figure I.26. Profil de dureté Vickers pour différentes conditions de brunissage avec une bille de $6,35$ mm	52
Figure I.27. Courbe de Wöhler.....	53
Figure II.1. Facteurs d'entrée et facteurs de sortie de brunissage	57
Figure II.2. Illustration des différentes étapes de l'expérimentation.	58
Figure II.3. Microstructures de l'acier 100C6.....	59
Figure II.4. Microscope optique modèle Nikon ECLIPSE LV 150N.....	60
Figure II.5. Mesure de la rugosité réalisées avec Le rugosimètre Mitutoyo SJ-301.....	61
Figure II.6. Mesure de la dureté réalisées avec l'indenteur Matzuzawa MXT70	61
Figure II.7. Eprouvette préparée sur tour.	63
Figure II.8. Tronçonneuse de type SERVOCUT 301 - MM.....	64
Figure II.9. Machine d'indentation Vickers (ZHU Z2,5 / zwickRoell).	65
Figure II.10. Tour de brunissage (modèle 16k20).....	66

Figure II.11. Principe du procédé du (SDB).	67
Figure II.12. Essai de fatigue : Machine GUNT Type WP 140.	68
Figure II.13. Eprouvettes de fatigue en flexion rotative.	69
Figure II.14. Microscope électronique à balayage SEM (QUANTA FEG 250).	69
Figure III.1. Effet du brunissage de la Rugosité Ra.	73
Figure III.2. Topographie de surface de l'acier 100C6.	73
Figure III.3. Effet du brunissage sur la dureté HV.	74
Figure III.4. Evolution de la dureté dans les couches superficielles de l'éprouvette traitée par brunissage.	75
Figure III.5. Valeurs expérimentales et prédites de la Rugosités	79
Figure III.6. Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité.	79
Figure III.7. Variation de la rugosité en fonction des paramètres du brunissage : a) P_y et i , b) f et i , c) P_y et f	81
Figure III.8. Illustration graphique des effets des paramètres de brunissage et leurs interactions sur la rugosité (ixf).	82
Figure III.9. Illustration graphique des effets des paramètres de brunissage et leurs interactions sur la rugosité ($i*P_y$).	83
Figure III.10. Illustration graphique des effets des paramètres de brunissage et leurs interactions sur la rugosité ($f \times P_y$).	84
Figure III.11. Taux de contribution des paramètres du brunissage et leurs interactions sur la rugosité	85
Figure III.12. Valeurs expérimentales et prédites de la Dureté.	86
Figure III.13. Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la dureté.	86
Figure III.14. Variation de la dureté e (HV_B) en fonction des paramètres de brunissage : a) P_y et i , b) f et i , c) P_y et f	88

Figure III.15. Illustration graphique de l'effet de l'interaction entre i et f sur la dureté après brunissage.....	90
Figure III.16. Illustration graphique de l'effet de l'interaction entre i et P_y sur la dureté après brunissage.....	90
Figure III.17. Illustration graphique de l'effet de l'interaction entre f et P_y sur la dureté après brunissage.....	91
Figure III.18. Taux de contribution des paramètres du brunissage et leurs interactions sur la dureté	92
Figure III.19. Graphe d'optimisation des réponses (R_{aB} et HV_B).	95
Figure IV.1. Géométrie de l'indentation a) sphérique; b) Vickers.....	99
Figure IV.2. Représentation schématique des hauteurs h_c , h_l et c	100
Figure IV.3. Représentation schématique des données de charge par rapport au déplacement de l'indenteur pour une expérience d'indentation	101
Figure IV.4. Courbes d'indentation de l'acier 100C6.....	104
Figure IV.5. Influence de la charge sur la profondeur de pénétration	105
Figure IV.6. Influence de la charge sur la nanodureté.....	107
Figure IV.7. Effet du brunissage sur les contraintes résiduelles.....	107
Figure IV.8. Effet du traitement sur la durée de vie en fatigue a) tournage, b) brunissage....	108
Figure IV.9. Rapport d'Amélioration de la Durée de Vie en Fatigue en Fonction de σ_{max} / R_m	109
Figure IV.10. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{max} = 460$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité par SDB.....	111
Figure IV.11. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{max} = 428$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité par SDB	112

Figure IV.12. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{\max} = 368$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité SDB	113
Figure IV.13. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{\max} = 200$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité par SDB.	114
Figure IV.14. Evolution du rapport $((A_F)/A_t)$ en fonction de l'amplitude de contrainte σ_{\max} .	115
Figure IV.15. Taux d'augmentation du rapport (A_F/A_t) induit par le brunissage.	116

Listes des tableaux

Tableau I.1. Caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté.....	29
Tableau II.1. Caractéristique mécanique du 100C6.....	59
Tableau II.2. Composition chimique de l'acier 100C6.....	59
Tableau II.3. Paramètres du brunissage et leurs niveaux.....	62
Tableau II.4. Résultats expérimentaux pour un plan (L27).	63
Tableau III.1. Analyse de la variance (ANOVA) du modèle pour la rugosité Ra.....	79
Tableau III.2. Analyse de la variance (ANOVA) du modèle pour la dureté HV.....	87
Tableau III.3. Optimisation simultanée des réponses HV_B et Ra_B	95
Tableau IV.1. Résultats des essais d'indentation.....	103

Nomenclature

SDB : Sliding Diamond Burnishing

HV_U : Dureté à l'état d'usinage

HV_B : Dureté a l'état de brunissage

Ra_U : Rugosité à l'état d'usinage

Ra_B : Rugosité a l'état de brunissage

c : Côté de la base carrée de l'empreinte

h_l Hauteur des triangles formant la surface réelle de contact

h : Profondeur totale de pénétration

h_s : Déplacement au périmètre du contact

h_{max} : Déplacement maximal

a : Rayon de contact

h_c : Profondeur de contact

h_f : Profondeur finale de l'empreinte résiduelle

R : Rayon de l'indenteur

d: Diagonale de l'empreinte

A: Surface réelle de contact

E_c : Module de Young effectif

E_i, E_s : Modules d'élasticité de l'indenteur et du matériau

v_i, v_s : Coefficients de Poisson de l'indenteur et du matériau

A_{RF} : Zone de rupture finale

A_t : Section totale de l'éprouvette

(A_F/A_t): Rapport de l'aire fissurée à la section totale.

A_F : Zone de rupture par fatigue

σ_y : Limite élastique

F_{max} : Charge maximale appliquée

P_m : Pression de contact

R_m : Résistance maximale du matériau

σ_{max}: Contrainte maximale en fatigue

σ_{max}/R_m : Rapport sans dimension entre contrainte maximale et résistance maximale

Introduction Générale

Introduction générale

Les matériaux jouent un rôle essentiel dans notre quotidien, et le développement technologique dépend largement de leurs choix dans le domaine de l'ingénierie mécanique. La finition de surface d'un produit est primordiale dans le processus de fabrication, car elle détermine la qualité de l'ajustement et de la finition de tout composant.

Les procédés de finition permettent d'atteindre les dimensions requises en éliminant l'excès de matière sous forme de copeaux. Ces opérations génèrent à la pièce des contraintes mécaniques intenses et un échauffement localisé, ce qui peut laisser des marques sur la surface. De plus, la combinaison de la pièce, de l'outil et de la machine forme un système vibratoire qui peut entraîner des variations aléatoires, forcées ou induites. En conséquence, la surface usinée peut être plus ou moins endommagée.

Les méthodes traditionnelles de finition, bien qu'elles permettent d'atteindre une certaine rugosité, n'offrent pas toujours une qualité optimale. Pour cette raison, les industries mécaniques adoptent de plus en plus des traitements mécaniques de surface (TMS) dans le processus de fabrication, qui génèrent une déformation plastique superficielle (DPS). Parmi les principaux TMS figurent le grenailage (shot peening), le galetage, le brunissage à bille, le brunissage par glissement, ainsi que le brunissage assisté par vibrations ultrasoniques. Ces procédés jouent un rôle essentiel en conférant aux matériaux des propriétés physiques et mécaniques améliorées, telles que l'intégrité de surface, la résistance à la fatigue et la génération de contraintes résiduelles de compression.

Parmi ces procédés, le brunissage à la pointe en diamant par glissement (SDB – *Sliding Diamond Burnishing*) occupe une place particulière en raison de son efficacité à améliorer les propriétés des couches superficielles. Il est reconnu pour ses effets sur la réduction de la rugosité, l'augmentation de la dureté et la génération de contraintes résiduelles de compression. Ces améliorations ont généralement un impact positif sur l'intégrité de surface et, par conséquent, sur la tenue en fatigue.

Cependant la réponse de sortie résultant du Brunissage demeure spécifique aux conditions de travail (état initial des couches superficielles, lubrification...) et les divers paramètres d'entrée (v , f , P_y , i , ...) avec lesquelles il est conduit. Ainsi, le choix des paramètres de ce procédé est essentiel pour améliorer l'intégrité de surface. Il appartient d'une part, de bien les choisir et cerner leur domaine d'étude à partir des essais unis factoriels et d'autre part de les optimiser à travers leurs effets et les interactions entre eux pour tirer la meilleure contribution vis-à-vis les réponses de sortie. D'autre part, l'influence des paramètres de l'intégrité de surface est telle que les réponses souhaitées peuvent être obtenues avec des paramètres dont les niveaux

optimaux sont souvent incohérents lorsqu'ils sont ajustés individuellement. C'est le cas par exemple, lorsqu'on veut augmenter la dureté et réduire la rugosité en même temps. Cela implique une approche d'optimisation multi-objectif, permettant de concilier ces critères conflictuels afin de maximiser les performances globales telle que la tenue en fatigue.

Cette étude vise à améliorer l'intégrité de surface des pièces mécaniques grâce au brunissage par pointe en diamant. L'objectif est d'optimiser la rugosité, la dureté et les contraintes résiduelles de l'acier 100C6, afin de renforcer sa résistance à la fatigue et de prolonger sa durée de vie. L'intégration de ce procédé dans les opérations d'usinage permet de mieux contrôler les propriétés superficielles et d'atteindre des performances mécaniques optimales.

Le travail est organisé en quatre chapitres :

- **Le premier** chapitre traite d'une manière générale les traitements mécaniques de surface. L'accent est mis sur le brunissage au moyen d'une pointe en diamant, où l'intégrité de surface et les propriétés mécaniques des matériaux ont été mises en relief et un état d'art a été dressé à cet effet.

- **Le deuxième chapitre** présente les équipements expérimentaux utilisés, en détaillant les caractéristiques du matériau, l'outil de brunissage et les instruments de mesure. La méthodologie expérimentale est inspirée de la MSR. Un plan d'expérience de Taguchi L₂₇ a été dressé pour la conduite des essais.

Le **troisième chapitre** est consacré à l'analyse de variance (ANOVA) appliquée aux paramètres du brunissage, afin d'optimiser la rugosité de surface et la dureté. Cette analyse permet d'identifier les facteurs et les interactions significatives entre les paramètres du procédé, conduisant à une meilleure qualité de surface et une reproductibilité accrue. Les relations entre ces paramètres et les réponses observées sont modélisées par une approche mathématique validée.

Le **quatrième chapitre** regroupe les résultats expérimentaux liés à la résistance à la fatigue et les contraintes résiduelles de la surface après brunissage. Les essais, réalisés dans des conditions contrôlées, évaluent comment ce procédé modifie l'intégrité de surface de l'acier 100C6, mettant en avant des effets positifs sur sa tenue en fatigue. Par ailleurs, les contraintes résiduelles ont été étudiées à l'aide de la méthode de nanoindentation. Cette technique permet une caractérisation précise des variations de contraintes dans les couches superficielles du matériau, offrant ainsi un aperçu détaillé des modifications induites par le brunissage à des échelles très fines.

Chapitre I

Recherches Bibliographiques

I.1. Introduction

Les aciers, en tant qu'alliages métalliques largement utilisés, se distinguent par leurs propriétés mécaniques et leur adaptabilité à diverses applications industrielles. Leur comportement et leur performance dépendent de leur composition chimique et des traitements thermiques ou mécaniques appliqués [1]. Les traitements mécaniques de surface (TMS) améliorent les propriétés des couches superficielles des matériaux, notamment en renforçant leur résistance à l'usure, à la fatigue et à la corrosion, grâce à des modifications de la rugosité, de la dureté et des contraintes résiduelles [2], [3]. Parmi ces techniques, le brunissage par glissement, un procédé respectueux de l'environnement, améliore la rugosité de surface et la tenue en fatigue en générant des contraintes de compression résiduelles qui retardent la propagation des fissures [4]. L'optimisation des paramètres du brunissage, tels que la pression, la vitesse et le nombre de passes, constitue une étape essentielle pour garantir des performances optimales [5].

I.2. Les aciers : élaborations et mise en œuvre**I.2.1. Généralité sur les aciers**

L'acier est un alliage principalement constitué de fer et de carbone (0,008 à 2,14 % en masse), où la teneur en carbone influence ses propriétés mécaniques, telles que la résistance et la dureté [1]. Des éléments d'alliage et des traitements thermiques permettent d'améliorer ses caractéristiques, donnant lieu à des aciers alliés et traités [6]. Cet alliage offre de nombreux avantages, notamment de bonnes propriétés mécaniques, un coût de production réduit et une recyclabilité élevée [7], [8]. Cependant, il présente des limites, comme une faible résistance à la corrosion, qui peut être corrigée par des traitements de surface ou l'ajout d'éléments inoxydables [9].

I.2.2. Historique de l'acier

L'histoire de l'acier remonte à l'Âge du fer, où les premiers aciers étaient produits à partir de loupe de fer dans des bas fourneaux. Les premières techniques de fonte apparaissent en Chine vers -453, et ce procédé se répand progressivement en Europe [7]. En 1786, la métallurgie devient une science avec la définition précise des trois principaux produits ferreux : fer, fonte et acier [10]. Les révolutions industrielles des XIXe et XXe siècles marquent un tournant dans la production d'acier, notamment avec le procédé Bessemer, suivi des améliorations de Thomas et Gilchrist, qui permettent une fabrication à grande échelle et économiquement avantageuse. [10].

I.2.3. Fabrication de l'acier

Aujourd'hui, deux procédés principaux permettent l'élaboration de l'acier :

1. Le haut fourneau : il utilise du minerai de fer et du coke, et la réduction du carbone se fait dans un convertisseur [11].
2. Le four électrique : il permet de recycler de l'acier récupéré, on parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique.

I.2.4. Mise en œuvre des aciers

L'usinage dur (ou tournage dur) permet aujourd'hui de traiter des aciers ayant une dureté supérieure à 47 HRC, ce qui était auparavant réservé au meulage [12], [13]. En plus de réduire les coûts et d'améliorer la productivité, cette technique permet d'éviter l'apparition de microfissures ou de brûlures sur les surfaces usinées [14]. Cette évolution ouvre ainsi la voie à de nouvelles méthodes de fabrication plus efficaces, mieux adaptées aux exigences des matériaux modernes, tout en améliorant l'intégrité de surface, notamment en termes de précision et de durabilité.

I.2.5. État de l'Art sur l'Usinabilité de l'Acier 100C6

L'acier 100C6, est un matériau largement utilisé dans les applications de roulements en raison de sa haute résistance à l'usure et de sa dureté [15]. Toutefois, son usinabilité pose des défis en raison de sa ténacité et de sa propension à l'usure des outils de coupe [16]. Des techniques avancées, comme le brunissage et le traitement thermique, sont souvent employées pour améliorer ses performances lors de l'usinage. Tan et al. [17] ont étudié l'influence du double revenu sur la microstructure et l'usinabilité de l'acier 100C6, constatant que la force de coupe la plus faible est obtenue à des vitesses de coupe élevées et à des vitesses d'avance faibles, comme illustré dans la figure I.1.

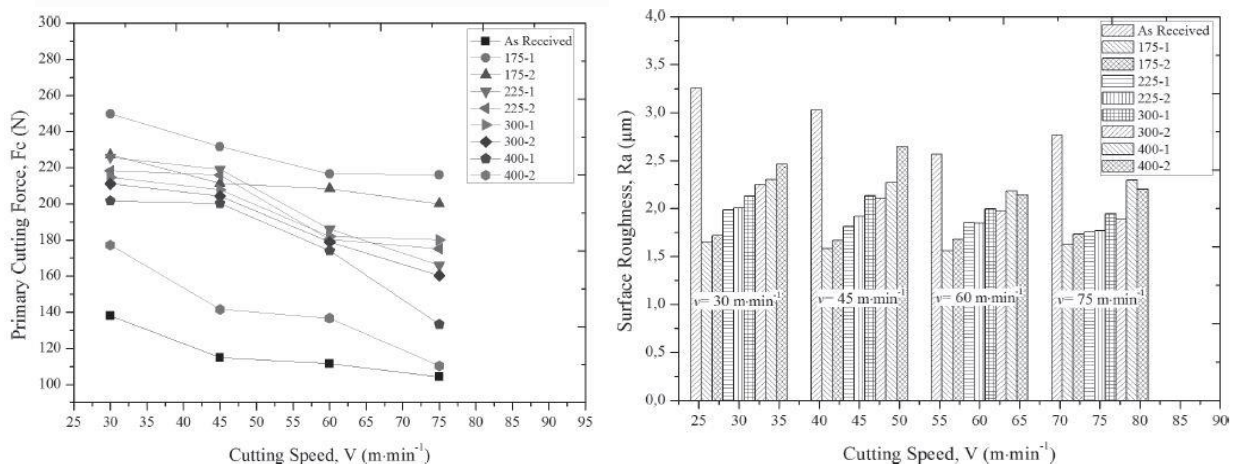


Figure I.1. : a) Variation de l'effort de coupe primaire (F_c) et de la rugosité de surface (R_a), b) en fonction de la température et du nombre de revenus répétées [17].

Des recherches antérieures [17], [18] ont montré que des traitements thermiques tels que la trempe bainitique améliorent les propriétés mécaniques de cet acier,[18] bien que l'impact de ces traitements sur l'usinabilité soit moins documenté.

Bouacha et al. [19] ont utilisé l'ANOVA pour déterminer que la vitesse d'avance influence principalement la rugosité de surface, tandis que la profondeur de coupe affecte les efforts de coupe, les résultats étant optimisés à des paramètres spécifiques de coupe. De même, Meddour et al. [20] ont démontré, à travers la figure 2, que l'ajustement de ces paramètres peut minimiser les efforts de coupe et améliorer la rugosité.

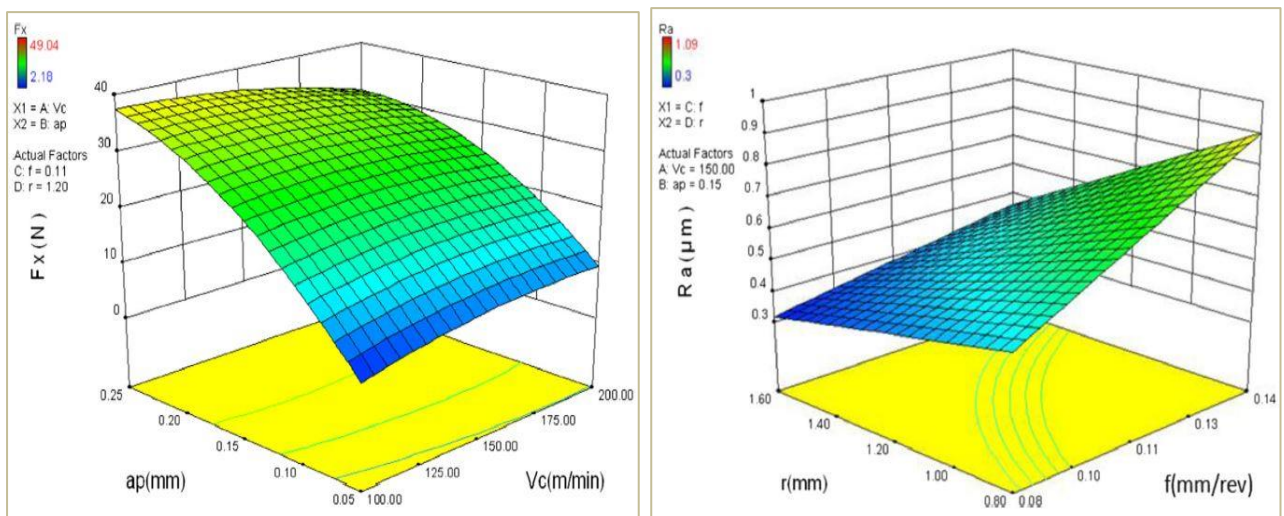


Figure I.2. : a) Effet de la profondeur de coupe et de la vitesse de coupe sur la force d'avance F_x , b) et effet du rayon du bec de l'outil et de la vitesse d'avance sur la rugosité de surface R_a [20].

Panda et al. [6] ont également confirmé que les outils en carbure cémenté non revêtu sont efficaces à des vitesses de coupe élevées mais avec une vitesse d'avance réduite, validé par l'analyse de variance (ANOVA) et illustré dans plusieurs séries d'essais.

Dans ce chapitre, l'optimisation du brunissage a été étudiée en examinant l'influence simultanée de plusieurs réponses, telles que la rugosité (R_a) et la dureté (HV), sur la tenue en fatigue.

Une revue de la littérature a été réalisée pour identifier les lacunes existantes, notamment l'absence d'études sur l'efficacité du SDB pour améliorer le comportement à la fatigue de l'acier 100C6. Ensuite, l'approche expérimentale et statistique pour évaluer l'impact du brunissage sur cet acier est détaillée.

Des modèles du second ordre avec interaction ont été développés par analyse de régression, suivis d'une analyse de variance (ANOVA) pour analyser les effets des facteurs de contrôle. Enfin, les paramètres du brunissage ont été optimisés à l'aide de l'analyse de la fonction de désirabilité (AFD) afin d'obtenir la meilleure rugosité de surface et microdureté, favorisant ainsi une meilleure tenue en fatigue.

I.3. L'intégrité de surface

L'intégrité de surface désigne les caractéristiques d'une surface obtenue après usinage ou autre procédé de mise en forme, en relation avec ses performances en service [21]. Elle inclut les propriétés topographiques, mécaniques, chimiques et métallurgiques de la surface ainsi que du matériau immédiatement sous-jacent. Ces propriétés comprennent la rugosité, la dureté, les contraintes résiduelles, la microstructure et la composition chimique. En fonction du domaine d'application, les exigences peuvent varier : mécanique (état de surface et résistance aux efforts), métallurgique (résistance à la corrosion, dureté), thermique (conductivité, résistance thermique), tribologique (propriétés de frottement, adhésion) et optique (apparence, réflexion de la lumière). La surface est considérée non seulement comme une entité géométrique, mais aussi comme un volume de matériau affecté par le procédé, qui peut être décomposé en couches selon les phénomènes observés (voir Figure I.3).

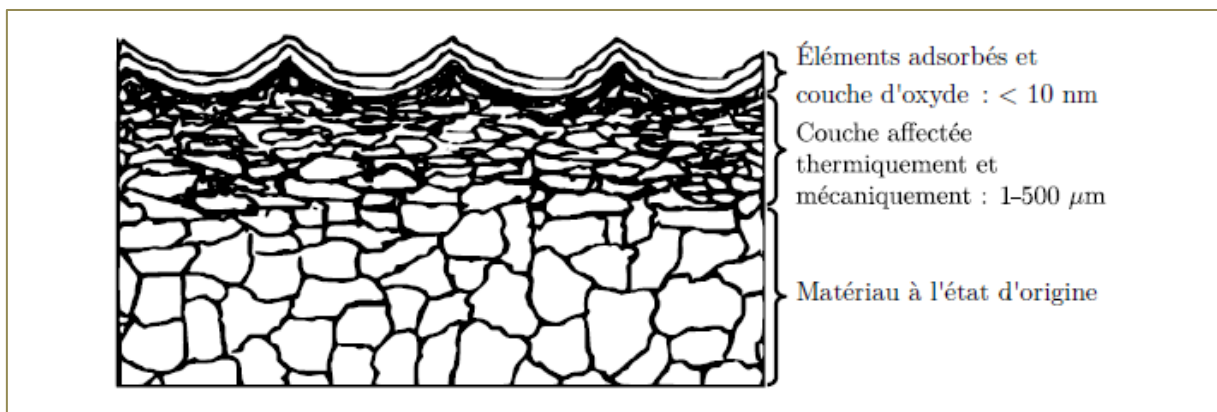


Figure I.3. Schéma des différentes couches affectées par un procédé de fabrication [21].

I.3.1. Intérêt de la Finition de surface

La finition de surface est une étape cruciale dans le traitement des pièces, visant à optimiser leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles. Elle contribue directement à l'amélioration de l'intégrité de surface, qui englobe des paramètres essentiels tels que la rugosité, les contraintes résiduelles, la microstructure et l'état d'érouissage [22]. Ces caractéristiques influencent fortement la tenue en fatigue, la résistance à l'usure et le comportement global des pièces dans des environnements exigeants [23].

L'efficacité d'une méthode de finition dépend des chargements mécaniques, thermiques ou chimiques appliqués sur la surface, mais également des objectifs spécifiques de l'application. Lors du tournage, un procédé couramment utilisé, les charges thermomécaniques modifient la rugosité en fonction des paramètres d'usinage tout en créant des contraintes résiduelles complexes qui alternent entre traction et compression [24], [25]. Cette variabilité nécessite un contrôle strict pour garantir la qualité des pièces produites.

Dans cette optique, le brunissage se distingue comme une solution particulièrement efficace pour la finition des surfaces. Ce procédé mécanique permet de réduire significativement la rugosité, d'introduire des contraintes résiduelles de compression favorables sur une profondeur allant de 0,1 à 0,5 mm, et d'améliorer la microstructure en surface grâce à un effet d'érouissage [26]. Ces caractéristiques renforcent la résistance en fatigue et prolongent la durée de vie des composants.

Le choix du brunissage repose sur sa capacité à répondre aux exigences des applications critiques où une intégrité de surface optimale est requise. Ce procédé offre des avantages distincts, notamment une meilleure régularité des propriétés mécaniques et une adaptation aux matériaux variés, ce qui en fait une solution privilégiée pour de nombreuses industries [27].

I.3.2. L'état géométrique

La topographie de surface, qui inclut la rugosité et l'ondulation, joue un rôle essentiel dans la performance des pièces mécaniques. Elle peut être analysée à l'aide de techniques comme la profilomètre par contact, conforme à la norme ISO 97, ou par des méthodes optiques modernes, permettant une caractérisation précise en 3D [28], [29]. La rugosité, définie par des paramètres tels que Ra, Rt et Rz, résulte des processus de fabrication, comme l'usinage, et influence des propriétés fonctionnelles comme le frottement [28], [30]. L'ondulation, caractérisée par des irrégularités de surface espacées de plus de 1 mm, peut être causée par des vibrations, des erreurs de machines ou des défauts inhérents au matériau [31], [32]. Enfin, les normes comme DIN 4760 classent ces irrégularités en catégories, facilitant leur analyse et leur contrôle [28] (Voir figure I.4).





Shape deviation	Kind of deviation
1st order: Form deviation 	Unevenness, ovality, unplanarity
2nd order: Waviness 	Waves
3rd order: Roughness (grooves) 	Grooves
4th order: Roughness 	Cones, corrugations

Figure I.4. Classement morphologique DIN 4760:1982 [28]

Les défauts peuvent être dus à des défauts inhérents, tels que des inclusions, des fissures, des trous de soufflage, etc (Voir figure I.5). dans la pièce qui sont exposés lors de l'usinage, ou qui peuvent résulter du processus d'usinage [33].

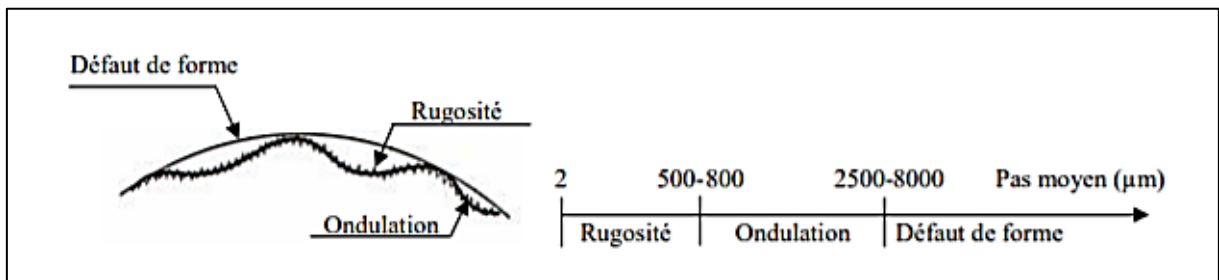


Figure I.5. Défauts de surface [33].

I.3.2.1 Paramètres de rugosité

La rugosité représente les motifs géométriques élémentaires à caractère répétitif, tels que les traces d’outils générées par l’usinage ou les impacts de particules sur une surface grenillée [34]. Elle constitue un indicateur clé de la qualité de surface. Une surface rugueuse, souvent assimilée à un phénomène aléatoire, est généralement étudiée et modélisée à l'aide d'une approche statistique.

Parmi les paramètres les plus couramment utilisés en usinage figurent Ra et Rz. Le paramètre Ra, souvent privilégié en laboratoire pour sa précision, représente la moyenne arithmétique des écarts absolus du profil de rugosité par rapport à la ligne médiane. Il est calculé sur une portion définie du profil, appelée longueur d’évaluation (l_m), selon l’équation suivante (I.1) :

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Y_i| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=\zeta}^n |Y_i| \tag{I.1}$$

Ra, souvent privilégié pour sa précision, représente la moyenne arithmétique des écarts absolus du profil de rugosité par rapport à la ligne médiane (Figure I.6).

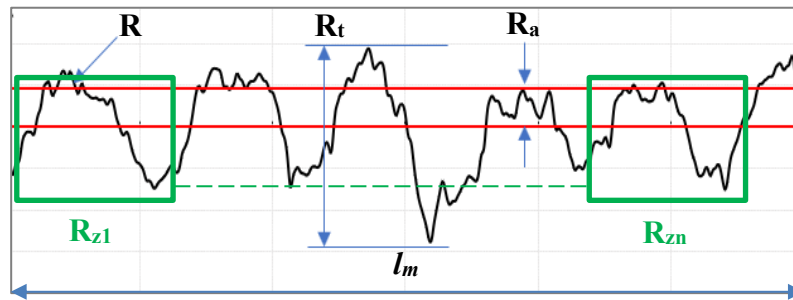


Figure I.6. Rugosité moyenne arithmétique.

Le choix de l_m , ainsi que des conditions de mesure comme l'orientation et la localisation, est déterminant pour obtenir des valeurs représentatives et fiables [35]. Ces critères assurent une meilleure caractérisation de l'état de surface, essentielle pour répondre aux exigences des applications industrielles.

R_q représente la moyenne quadratique des valeurs du profil (Figure I.6) :

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I. 2})$$

R_z est défini comme la moyenne des cinq plus grandes hauteurs de pics du profil :

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{zi} \quad (\text{I. 3})$$

R_t correspond à l'écart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil (Figure I.6) :

$$R_t = y_{max} - y_{min} \quad (\text{I. 4}).$$

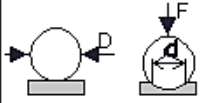
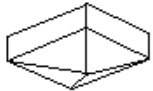


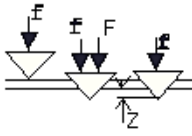
I.3.3. L'état physique

I.3.3.1. La dureté

La dureté est une propriété qui reflète la résistance d'un matériau à la pénétration. Cette pénétration dépend de plusieurs facteurs principaux : les déformations élastiques et plastiques, le frottement entre l'indenteur et le matériau, la géométrie du pénétrateur, ses propriétés mécaniques, ainsi que la charge appliquée [36].

Le tableau 1.1 résume les caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté utilisées : la dureté Brinell (HB), la dureté Vickers (HV), et les duretés Rockwell C et B (HRC et HRB). Bien que les valeurs de dureté soient exprimées sans dimension, les définitions des duretés Brinell et Vickers montrent qu'elles sont homogènes à des contraintes.

Tableau I.1 Caractéristiques des principales méthodes de mesure de la dureté.

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
BRINELL	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diamètre)	500 ou 3000 kgF		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
VICKERS	Pyramide de diamant à base carré : angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgF (microdureté : 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d)	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
ROCKWELL C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120° 	Précharge f de 10 kg; F= 150 kgF		Profondeur de l'empreinte (Z)	HRC = f(Z)
ROCKWELL B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kg; F= 100 kgF	Même principe que ROCKWELL C	Profondeur de l'empreinte (Z)	HRB = f(Z)

Les mesures de dureté, simples à réaliser, sont suffisamment sensibles pour détecter et quantifier de faibles modifications. Dans certaines conditions, ces mesures peuvent être effectuées sur des pièces finies, ce qui fait des essais de dureté des tests non destructifs.

La figure I.7 illustre la variation de la dureté Vickers (Hv) en fonction de la charge appliquée (P), mettant en évidence trois domaines principaux : la nanodureté, la microdureté, et la macrodureté. À faible charge (<1 gf), la nanodureté est mesurée, reflétant les propriétés locales à l'échelle nanométrique, souvent influencées par des effets de surface. Dans la plage intermédiaire (1 à 200 gf), la microdureté est déterminée, représentant des variations microscopiques dans les matériaux. Enfin, pour des charges plus élevées (>2 Kgf), la macrodureté est obtenue, offrant une évaluation globale du matériau. Cette transition reflète l'influence de la charge sur la mesure de dureté, nécessitant une charge adaptée selon l'échelle étudiée.

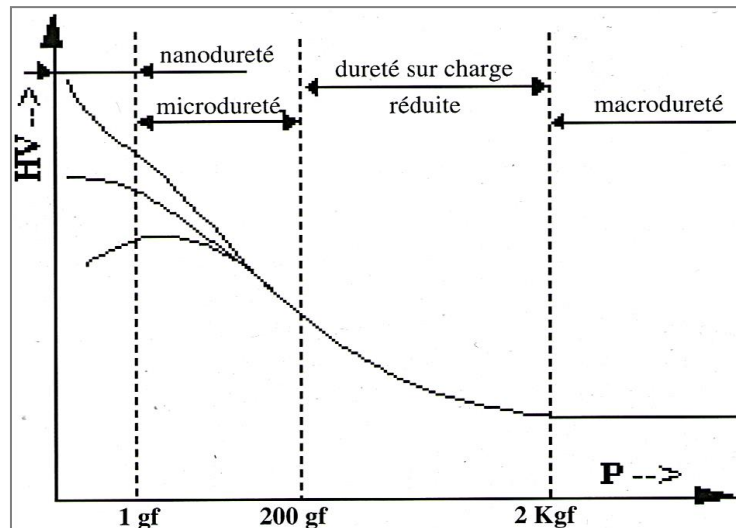


Figure I.7. Définitions des différents domaines de dureté [37].

I.3.3.2. Contraintes résiduelles

Définition :

Les contraintes résiduelles sont des tensions internes qui subsistent dans un matériau ou un composant après son traitement, en l'absence de forces externes ou de variations thermiques. Ces contraintes résultent souvent des processus de fabrication, tels que le soudage, l'usinage, ou les traitements thermiques [38], [39].

I.3.3.3. Classification des Contraintes Résiduelles

Les contraintes résiduelles peuvent être de deux types principaux : macroscopiques, affectant l'ensemble de la pièce à grande échelle, et microscopiques, présentes au niveau des grains ou à l'intérieur des grains, en raison des propriétés des phases ou des défauts cristallins [38], [40]. Les techniques de mesure, comme le perçage ou le retrait de couches, se concentrent généralement sur les contraintes macroscopiques, car elles moyennent les contraintes microscopiques à zéro [40], [41] (Voir Figure I.8).

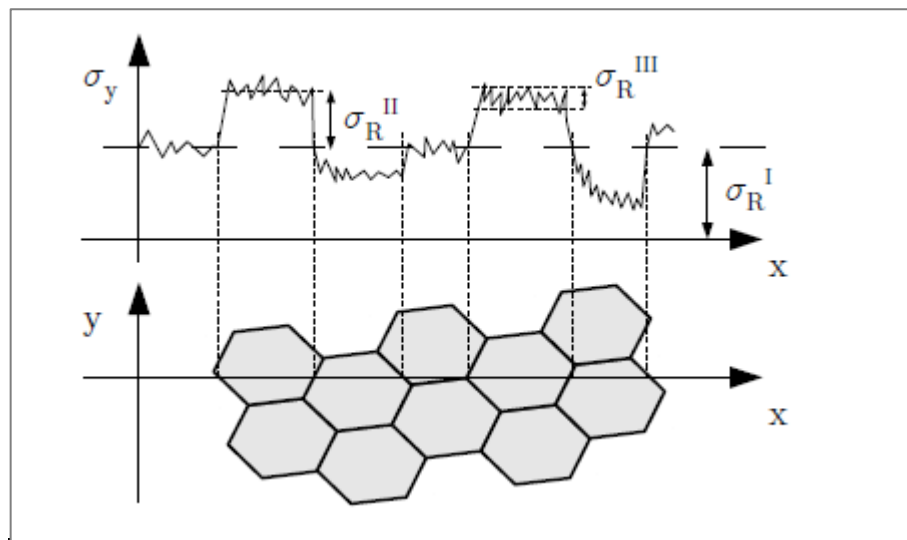


Figure I.8. Représentation des différents ordres de contraintes résiduelles en fonction de l'échelle d'observation [42].

I.3.3.4. Origines et Mécanismes des Contraintes Résiduelles

Les contraintes résiduelles se forment au cours de divers procédés de fabrication et de traitements, tels que la déformation plastique, les gradients thermiques et les transformations de phase. Ces contraintes peuvent être présentes dès l'état brut du matériau ou être introduites durant les étapes de fabrication et d'usinage, ainsi qu'au cours de la vie en service du composant [41], [43]. Les implications de ces contraintes sur la performance des pièces mécaniques sont majeures, influençant la durabilité, la résistance à la fatigue et la tenue structurelle globale [44].

Les contraintes résiduelles, qui se divisent en trois catégories principales : mécaniques, thermiques et chimiques ; influencent de manière significative les propriétés d'un matériau. Les contraintes mécaniques apparaissent lors de processus de déformation non uniforme, comme le soudage ou l'usinage, et peuvent générer des contraintes compressives ou de traction en surface, comme c'est le cas avec le grenaillage ou le meulage [39], [41].

D'autre part, les contraintes thermiques sont liées aux gradients de température causés par des traitements thermiques, entraînant des contraintes compressives en surface et de traction en profondeur [45]. Les contraintes chimiques, résultant de transformations de phase ou de réactions chimiques, sont notamment générées lors de traitements comme la nitruration ou la cémentation, où des contraintes compressives se forment en surface [44].

Ces différentes contraintes se manifestent à différents niveaux : macroscopiques (1er ordre), où elles affectent directement la résistance et la rupture du matériau [38], microscopiques (2^{ème} ordre), liées à l'érouissage et à l'endommagement du matériau [40], et atomiques (3^{ème} ordre), dues aux défauts cristallins, influençant à long terme les propriétés

mécaniques globales [38]. Ces types de contraintes interagissent étroitement et affectent la performance globale du matériau.

I.3.3.5. Méthodes de mesure des contraintes résiduelles

Les techniques de mesure des contraintes résiduelles évaluent généralement les déformations du matériau, et les contraintes résiduelles sont ensuite déduites en utilisant des paramètres matériels comme le module de Young et le coefficient de Poisson [41]. Il est fréquemment supposé que les contraintes soient uniformes dans le volume mesuré, tant dans le plan de surface que dans la profondeur [46].

Ces méthodes se divisent en deux catégories : destructives et non destructives. Les méthodes destructives nécessitent l'enlèvement de matière, mais ne sont pas adaptées lorsque la suppression de matériau peut affecter la résistance structurelle [45]. Les méthodes non destructives comprennent les techniques statiques, telles que la microscopie acoustique et la diffractométrie, qui analysent les anomalies dans les zones sous contrainte et le réarrangement atomique, bien que ces dernières puissent être influencées par des déformations plastiques [40].

Les méthodes dynamiques, comme l'acoustoélasticité et les méthodes thermiques, utilisent des charges ou des chauffages pour mesurer les réponses du matériau sous contrainte [41]. Une méthode récente d'indentation instrumentée, non destructive, surmonte certaines limitations des autres techniques en permettant d'évaluer les propriétés matérielles et les contraintes résiduelles par l'analyse continue de la courbe de charge-enfoncement [47]. Cette approche permet de caractériser de manière précise les matériaux et d'obtenir des résultats fiables sur les contraintes résiduelles, sans endommager la pièce.

À travers l'analyse de la rugosité et des contraintes résiduelles, il est possible d'approfondir l'impact du brunissage sur les propriétés des matériaux, en étudiant son rôle dans l'amélioration des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la fatigue. En effet, ces propriétés, (la tenue en fatigue), sont étroitement liées à l'intégrité de la surface du matériau. Le brunissage, en induisant des contraintes résiduelles compressives à la surface, contribue à améliorer cette résistance et à prolonger la durée de vie des composants soumis à des cycles de chargement.

I.4. La fatigue

I.4.1 Généralité et définition

La fatigue des matériaux est un phénomène mécanique complexe qui se manifeste par la détérioration progressive d'un matériau sous l'effet de charges répétées ou cycliques, même de

faible amplitude. Cette détérioration peut conduire à une fissuration et, éventuellement, à la rupture du matériau, même si la contrainte appliquée est inférieure à la limite de résistance du matériau. En raison de ses implications dans la durabilité et la sécurité des structures, la conception de la fatigue est essentielle dans de nombreux domaines, notamment l'aéronautique, l'automobile, et la construction.

Le but de réaliser des essais de fatigue est d'étudier la réponse des composants soumis à des contraintes périodiques. En règle générale, ces tests appliquent une contrainte de type sinusoïdal. Ils peuvent être menés en fonction de la contrainte ou de la déformation imposée. La figure I.9 présente l'évolution temporelle d'un cycle de contrainte sinusoïdale lors d'un test de fatigue, le cycle de fatigue est caractérisé par [48] :

- σ_a : Amplitude de contrainte
- σ_m : Contrainte moyenne
- σ_{min} : Contrainte minimale
- σ_{max} : Contrainte maximale

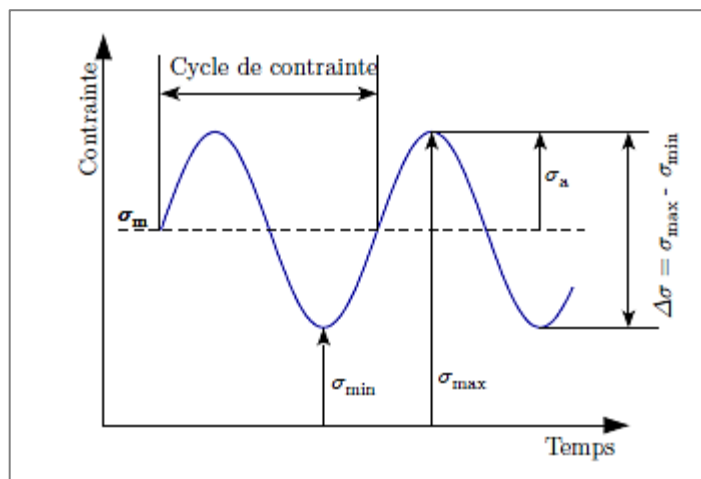


Figure I.9. Représentation et définition d'une sollicitation cyclique quelconque.

Selon la valeur de la contrainte moyenne σ_m , divers types de chargements sont identifiés et illustrés sur la figure I.10. Ces cycles se distinguent par le rapport des contraintes R , tel que défini dans l'équation 4.2. Pour les axes et arbres en rotation, le cycle à contrainte purement alternée, où $R\sigma = -1$, correspond le mieux au spectre de sollicitation réel de la pièce. L'analyse présentée dans le chapitre IV portera précisément sur ce cas, afin d'étudier le comportement en fatigue du matériau dans un contexte représentatif des conditions d'utilisation industrielles.

I: Contrainte ondulée de compression $1 < R_\sigma < +\infty$

II: Contrainte répétée de compression $R_\sigma = +\infty$

III: Contrainte alternée dissymétrique $-\infty < R_\sigma < -1$

IV: Contrainte purement alternée $R_\sigma = -1$

V: Contrainte alternée dissymétrique $-1 < R_\sigma < 0$

VI: Contrainte répétée de traction $R_\sigma = 0$

VII: Contrainte ondulée de traction $0 < R_\sigma < 1$

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{I.5}$$

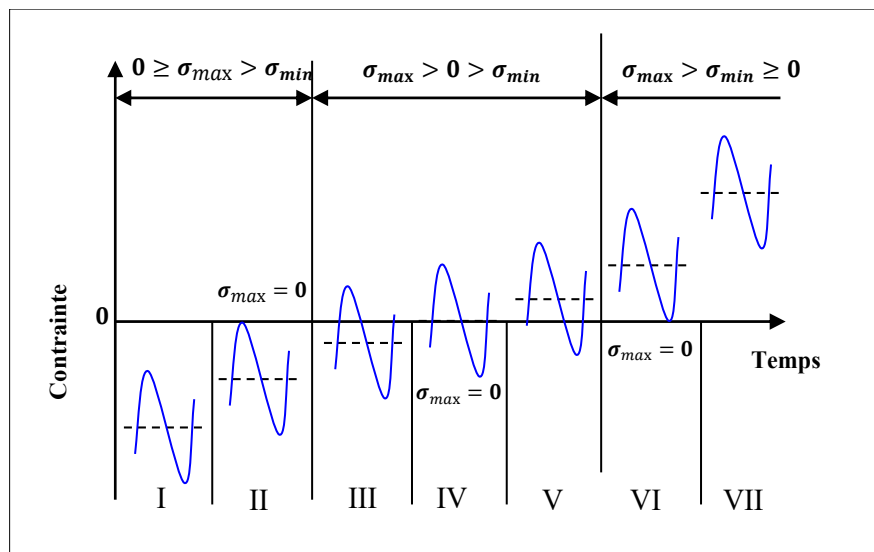


Figure I.10. Classification des différents types de sollicitation en fatigue avec rapport de contrainte R_σ correspondant. [48].

I.4.1.1. Amorçage et propagation de fissures de fatigue

La rupture par fatigue d'un matériau métallique polycristallin se décompose en trois étapes : l'amorçage de la fissure, la propagation d'une petite fissure et la propagation d'une fissure longue qui conduit à la rupture. L'amorçage de la fissure peut se produire en surface, à l'intérieur d'un grain ou entre deux grains, ainsi que sur un défaut de surface ou une inclusion. Une fois amorcée, la fissure courte suit le plan de cisaillement maximal et est influencée par la microstructure et les barrières microstructurales [48], [49].

Si l'amplitude des efforts appliqués est suffisamment importante, la fissure peut franchir ces barrières et continuer de se propager. Au-delà d'une certaine longueur, la contrainte normale augmente tandis que la contrainte de cisaillement diminue, ce qui peut conduire à une propagation en stade II dans une direction perpendiculaire ou en pseudo stade I dans une direction perpendiculaire macroscopiquement mais cristallographiquement locale. L'interaction

de la fissure courte avec les barrières microstructurales entraîne généralement une vitesse de propagation oscillante.

I.4.2 Processus et Mécanismes

La rupture par fatigue des matériaux métalliques polycristallins se déroule en trois phases principales (figure I.11) ; l'amorçage de la fissure, la propagation de petites fissures (stade I ou pseudo-stade I) et la propagation de fissures longues (stade II), menant à la rupture finale. Les fissures peuvent se former en surface, à l'intérieur ou entre les grains, ainsi que sur des défauts ou inclusions. Leur progression initiale suit le plan de cisaillement maximal et est fortement influencée par la microstructure et les barrières microstructurales [49], [50].

Lorsque les efforts appliqués sont suffisamment élevés, la fissure franchit ces barrières et continue sa propagation jusqu'à atteindre une taille critique. À ce stade, elle devient non cristallographique et se propage en direction perpendiculaire au chargement principal, conduisant finalement à la rupture [49].

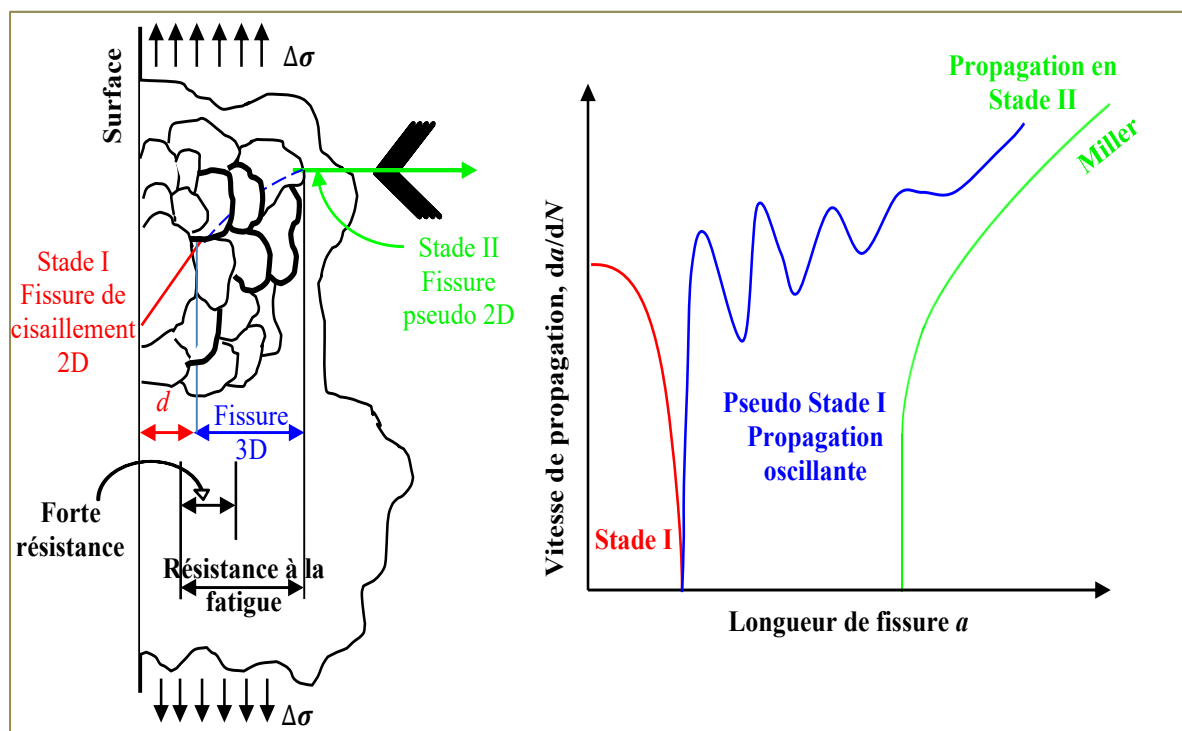


Figure I.11. Représentation des différents stades de propagation d'une fissure courte. [50].

Une fissure courte atteint une phase de propagation longue (stade II) après avoir parcouru 3 à 10 grains, suite à un nombre de cycles N_{pfc} [50]. Durant cette phase, la fissure se propage jusqu'à une longueur critique qui mène à la rupture (stade III).

Cette propagation suit la loi de Paris-Erdogan [51], dépendant de la taille de la fissure a , du nombre de cycles N et du facteur d'intensité des contraintes K . La durée de vie en fatigue totale, N_T , est la somme des cycles pour chaque phase : $N_T = N_a + N_{pfc} + N_{pfl}$, influencée par divers facteurs comme la sollicitation, le matériau, et les contraintes internes (Voir figure I.9).

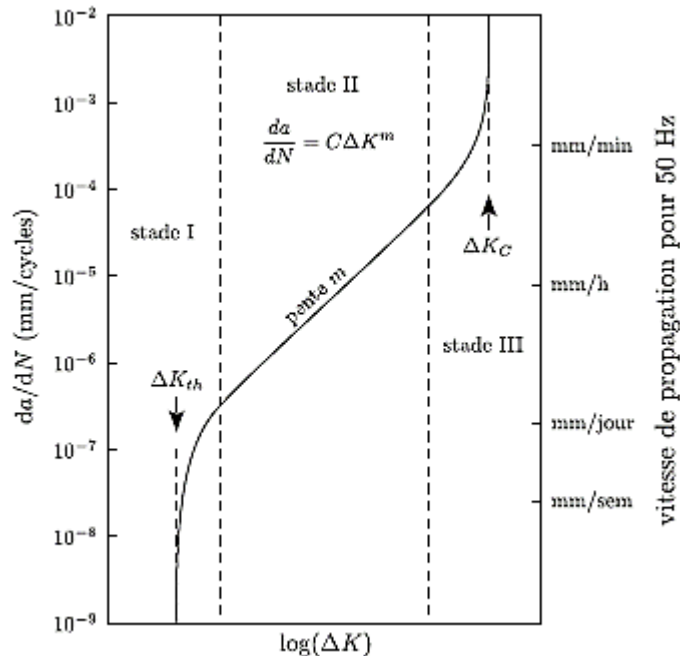


Figure I.12. Evolution des stades de propagation d'une fissure longue en mécanique linéaire élastique de rupture. [52], [53].

I.4.2.1. Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler, également appelée courbe contrainte-nombre de cycles (S/N), illustre la relation entre l'amplitude de la contrainte et le nombre de cycles avant la rupture. Elle comprend généralement trois zones distinctes :

- Un domaine de fatigue oligocyclique où des niveaux de contrainte élevés provoquent une rupture après un faible nombre de cycles,
- Un domaine à durée de vie finie où la rupture se produit après un nombre limité de cycles qui augmente à mesure que la contrainte diminue,
- Un domaine à durée de vie infinie où la rupture ne survient pas pendant la durée de vie prévue du composant.

Pour les aciers, la courbe présente souvent une asymptote horizontale représentant la limite de fatigue, bien que cette asymptote puisse être absente pour certains matériaux, comme les alliages d'aluminium, ou dans des conditions telles que la corrosion [48]. Déterminer la limite d'endurance est essentiel pour concevoir des composants et garantir leur fiabilité en service. Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire cette courbe, notamment le modèle

linéaire de Wöhler (Équation I.6), le modèle en log-log de Basquin [54] (Équation I.7), l'intégration de la région asymptotique par Stromeyer [55] (Équation I.8) et le modèle de Bastenaire [56], qui prend également en compte le comportement en fatigue oligocyclique (Équation I.9).

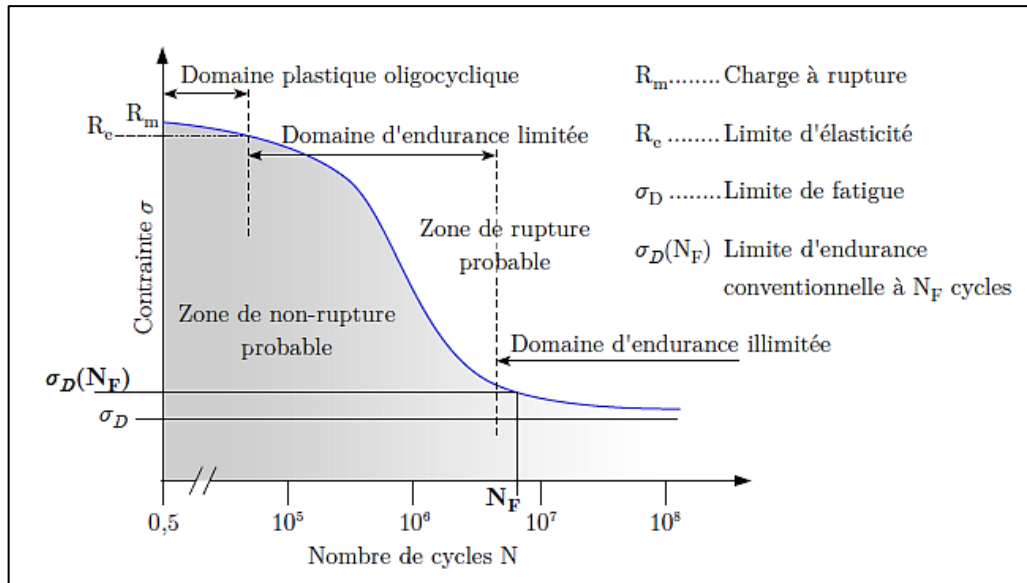


Figure I.13. Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue.

Model de Wöhler: $\log N_r = A\sigma + B$ (I.6)

Model de Basquin : $\log N_r = \log A - B \log \sigma$ (I.7)

Model de Basquin : $\log N_r = A - B \log(\sigma - \sigma_D)$ (I.8)

Model de Basquin : $\log N_r = \frac{A \exp(-C(\sigma - \sigma_D))}{(\sigma - \sigma_D)} - B$ (I.9)

Dans ces modèles, les paramètres A, B et C sont obtenues à partir de la courbe expérimentale, et le nombre d'essais nécessaires varie selon le modèle choisi. En raison de la dispersion, un grand nombre d'éprouvettes est nécessaire pour établir une courbe de Wöhler précise. Cependant, au lieu de chercher à obtenir la courbe entière, il est souvent plus pratique de se concentrer sur la limite d'endurance σ_D pour un nombre de cycles correspondant à la durée de vie souhaitée. Ce manuscrit utilise deux méthodes pour déterminer cette limite, choisies pour leur faible besoin en éprouvettes.

I.4.3 Les influences

I.4.3.1. Influence de l'intégrité de surface

La rugosité de surface joue un rôle clé en fatigue, car elle génère des singularités responsables de la concentration des contraintes, représentée par le facteur Kt. Cela accélère l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue. Il a été démontré que différentes rugosités,

obtenues par des procédés comme le fraisage, le meulage ou le polissage, influencent la tenue en fatigue des matériaux métalliques [56], [57]. Une augmentation de la rugosité entraîne généralement une diminution de la limite d'endurance.

Par ailleurs, bien que les paramètres locaux comme R_t et R_z (voir § I.3.3) soient souvent considérés comme les plus adaptés pour caractériser l'impact de la rugosité sur la tenue en fatigue, d'autres paramètres comme R_a et R_q peuvent également être corrélés à la limite d'endurance [58]. Les paramètres locaux, en particulier, permettent d'identifier les singularités qui concentrent les contraintes, mais leur utilisation reste complexe et coûteuse dans les environnements industriels.

En plus de la rugosité, la dureté de surface joue un rôle important dans la tenue en fatigue. Une dureté accrue peut améliorer la résistance aux déformations plastiques et retarder l'amorçage des fissures. Cependant, en l'absence de contraintes résiduelles, la rugosité devient un facteur dominant influençant la durée de vie des pièces. La présence de contraintes résiduelles compressives, souvent associée à une augmentation de la dureté, peut atténuer l'effet des concentrations de contraintes dues à la rugosité, retardant ainsi l'amorçage et la propagation des fissures [74][56]].

I.5. Traitements mécaniques de surface

I.5.1. Définition et Principe

Les traitements mécaniques de surface (TMS) consistent à modifier la surface d'une pièce par déformation plastique, sans enlèvement de matière [59]. Sous l'effet de forces appliquées par des outils spécifiques (bille, galet, pointe), les irrégularités de la surface initiale se déforment et se lissent, réduisant ainsi la rugosité [60]. La pression exercée provoque un écoulement du matériau en surface, déplaçant les parties en saillie vers les creux, ce qui crée un nouveau relief plus régulier.

Ce processus améliore non seulement l'aspect de la surface, mais aussi ses propriétés mécaniques, telles que la résistance à la fatigue [61]. Il existe plusieurs types de traitements mécaniques de surface (TMS), tels que le grenailage, le brunissage, le shot peening, et le brunissage par ultrasons, chacun ayant des applications spécifiques et étant proposé par diverses entreprises spécialisées. La figure 1 montre l'évolution des profilogrammes de surfaces après TMS, illustrant les effets de différentes forces de pression.

La figure I.14 montre que la profondeur de pénétration reflète directement l'effet de lissage obtenu lors du processus de brunissage. Pendant ce traitement, les aspérités de la surface

subissent une déformation plastique durable, qui contribue au lissage effectif de la surface, tandis que la déformation élastique, beaucoup plus faible, disparaît une fois la charge retirée. Contrairement à la distance totale parcourue par l'outil de brunissage, la profondeur de pénétration représente uniquement la transformation durable de la surface, excluant les déformations supplémentaires liées à l'outil, à la machine ou à la pièce [62].

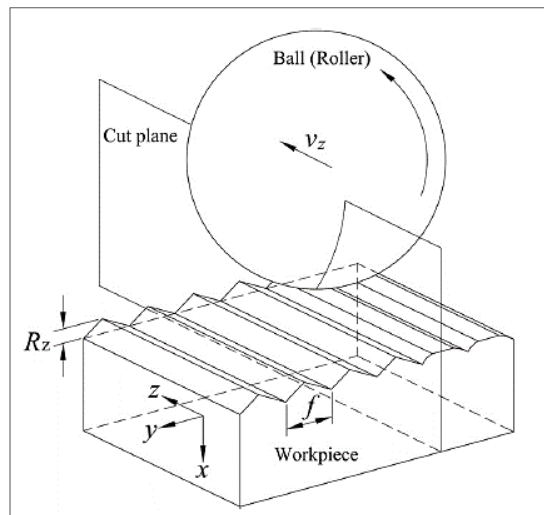


Figure I.14. Lissage des aspérités usinées par déformation plastique pendant le traitement mécanique de surface (TMS) [62].

I.5.1.1. Définition du brunissage et Applications

Le brunissage, est un procédé mécanique de finition de surface qui améliore l'intégrité et les performances des composants usinés. Cette technique est largement utilisée dans diverses industries pour le traitement des surfaces cylindriques, sphériques et complexes [63]. Le brunissage se décline en plusieurs variantes, telles que le brunissage à billes, le brunissage par glissement [64], chacune offrant des avantages spécifiques en termes de rugosité de surface, de dureté et de contraintes résiduelles [63].

Les outils de brunissage à billes utilisent divers mécanismes pour générer la force nécessaire, comme des ressorts, des fluides sous pression ou des outils à haute rigidité [60]. Des outils hybrides, tels que ceux assistés par vibration ou par magnétisme [63], [65], représentent également des avancées importantes dans le domaine.

I.5.1.2. Définition du brunissage à la bille

Le brunissage à bille consiste à faire circuler une bille dure (en céramique, carbure ou acier) sur la surface de la pièce, induisant des déformations élastiques, élastoplastiques et plastiques au niveau des couches superficielles [4]. Ce procédé repose sur un mouvement relatif

entre la bille et la surface, générant une pression qui modifie la géométrie de la surface (Voir figure I.15). La cinématique de ce processus se caractérise par la vitesse de déplacement de la bille, la force appliquée et la trajectoire suivie, influençant directement l'intensité des déformations et l'évolution de la rugosité, de la dureté et des contraintes résiduelles de la pièce [66]. Les déformations plastiques engendrées par cette interaction favorisent un lissage effectif de la surface, ce qui améliore la précision dimensionnelle et la résistance à la fatigue des matériaux traités, comme l'acier [63].

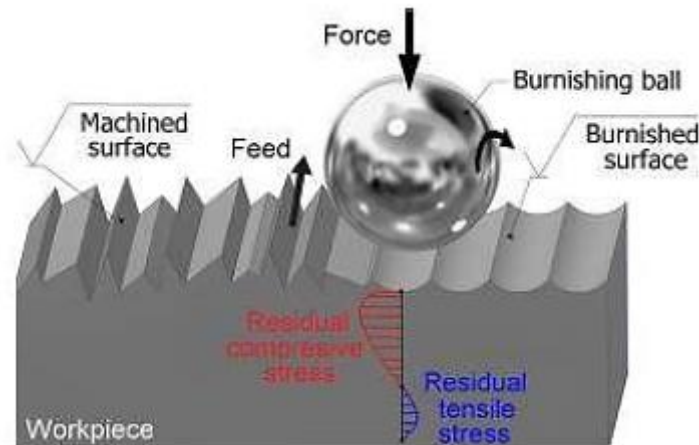


Figure I.15. Principe de bruissage à bille [63].

I.5.1.3. Définition et principe du brunissage par glissement (SB)

Le brunissage par glissement (SB) est un procédé statique de traitement de surface utilisant un outil simple, souvent en diamant, de forme sphérique ou cylindrique. Cet outil exerce une pression sur la surface, entraînant une déformation plastique des couches superficielles [67]. La précision obtenue dépend de la préparation préalable et du support élastique de l'outil.

Les paramètres principaux sont le rayon de l'outil, la force appliquée, la vitesse d'avance et la vitesse de brunissage. Ce procédé, réalisable sur des tours ou des centres CNC, est particulièrement adapté aux matériaux durs. La Figure I.16 montre son principe et son interaction avec la surface [68].

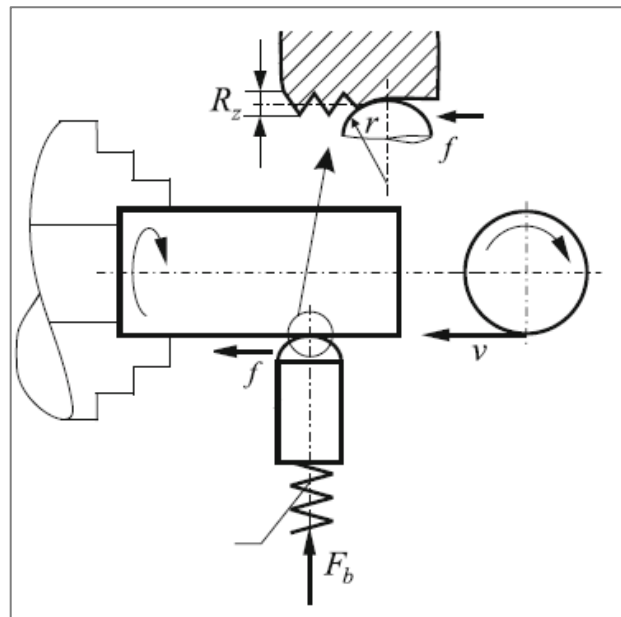


Figure I.16. Principe du brunissage par glissement [68].

I.5.2. Classification des méthodes de brunissage

Les méthodes de brunissage peuvent être classées selon la forme de l'élément déformant utilisé. On distingue principalement deux catégories : le galetage (RB), qui utilise un galet pour niveler la surface et améliorer la qualité du fini, et le brunissage à bille (BB), où une bille entre en contact avec la surface pour obtenir un fini miroir et augmenter les contraintes résiduelles de compression, tout en améliorant la dureté [63]. Le brunissage peut également être classé selon le type de contact entre l'élément déformant et la surface traitée : le brunissage par glissement (SB), caractérisé par un contact de frottement glissant, est utilisé pour le lissage des surfaces et l'amélioration de la finition, tandis que le galetage (RB) implique un contact par roulement, idéalisé pour réduire la rugosité et augmenter les contraintes résiduelles [63]. Parmi les méthodes avancées de brunissage, on trouve le brunissage par bille hydrostatique (BBHS), qui applique une pression uniforme pour générer des contraintes résiduelles compressives à des profondeurs significatives, ainsi que le brunissage assisté par ultrasons (SDB), qui combine les vibrations ultrasoniques pour améliorer la qualité de finition et augmenter la microdureté [69].

I.5.3. Mécanismes d'action du brunissage sur l'intégrité de surface

Le brunissage est une méthode d'usinage de finition qui améliore significativement les propriétés de service des pièces usinées, notamment en augmentant la résistance à la fatigue. Pendant le brunissage, la rugosité de la surface est aplanie, produisant un fini miroir [70], et des contraintes résiduelles de compression sont générées, ce qui renforce la couche superficielle.

En plus de rendre la surface lisse, le brunissage améliore la dureté en déplaçant le matériau des crêtes vers les vallées, ce qui condense la structure granulaire et renforce les caractéristiques de résistance de la surface [69], [71].

La figure I.17 présente un schéma des différentes méthodes de brunissage, illustrant les principes de fonctionnement de chaque technique. Elle met en évidence les variations dans les éléments déformants et les types de contact, tels que le brunissage par bille, par rouleau et assisté par ultrasons.

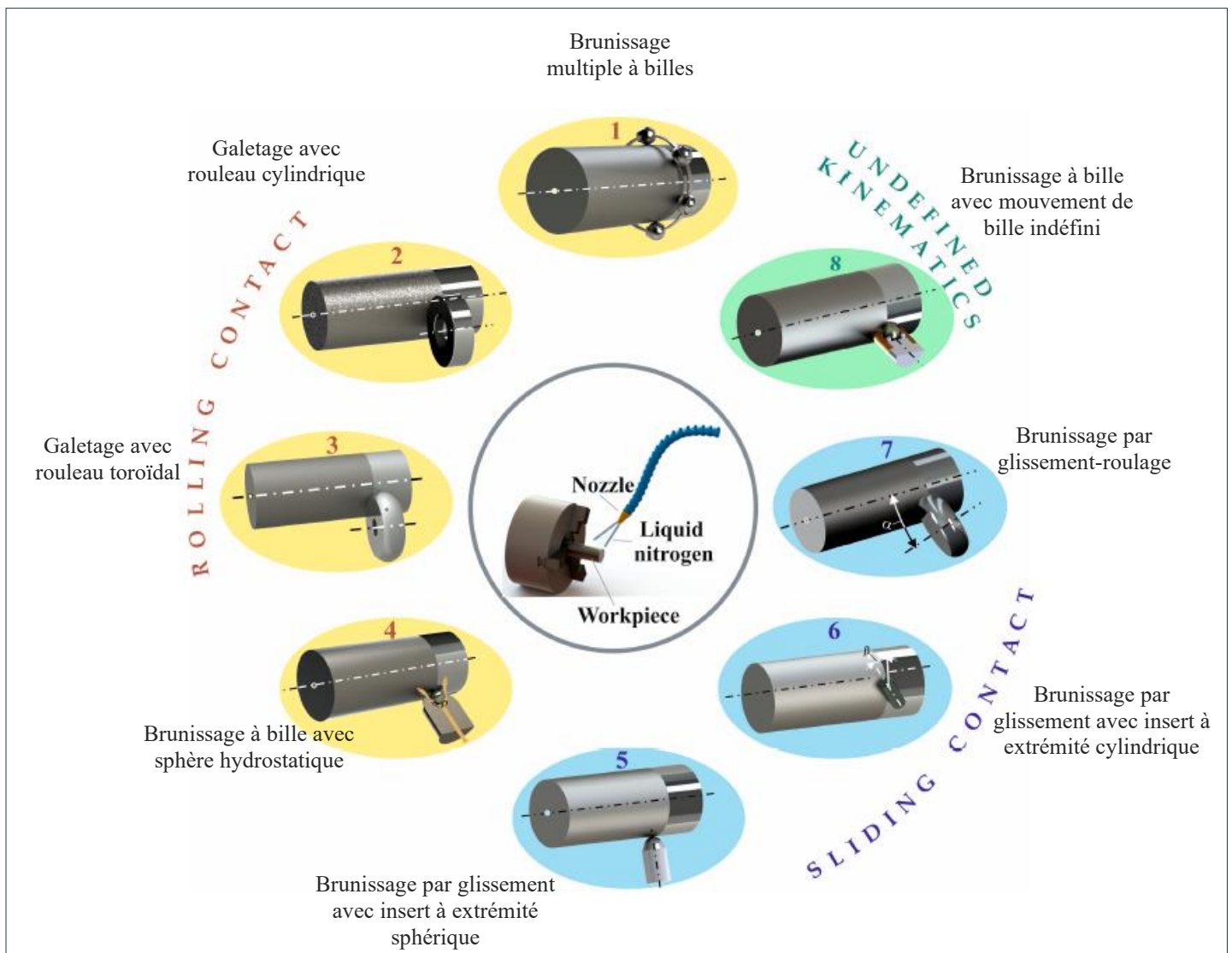


Figure I.17. Schémas des méthodes de brunissage [63].

I.5.3.1. Mécanisme d'amélioration de la rugosité par brunissage

Le brunissage est reconnu pour optimiser la rugosité et la dureté de la surface des matériaux. Les résultats expérimentaux montrent que ce procédé peut réduire la rugosité de surface jusqu'à 49,7 % tout en augmentant la dureté de 25,1 % [72]. Le brunissage modifie considérablement l'état de surface de l'acier inoxydable austénitique AISI 316Ti en réduisant

sa rugosité. Sous l'effet de la déformation plastique induite par l'outil de brunissage, les irrégularités initiales sont aplanies, ce qui entraîne une diminution significative des valeurs de rugosité. Les résultats expérimentaux montrent que le brunissage permet d'atteindre une rugosité moyenne $Ra=0.055 \mu\text{m}$, indiquant une surface beaucoup plus lisse par rapport à l'état usiné. Cette amélioration de la rugosité contribue à optimiser le comportement tribologique du matériau et à prolonger sa durée de vie en service. [68].

I.5.3.2. Mécanisme d'écrouissage et évolution de la dureté

Le brunissage contribue significativement à l'augmentation de la dureté superficielle par écrouissage. Il a été démontré que cette technique est plus efficace que le meulage conventionnel pour améliorer la texture de surface, notamment sur l'acier trempé [73]. Les études de modélisation par éléments finis ont également confirmé l'amélioration de la dureté et des contraintes résiduelles de compression après brunissage sur des matériaux tels que l'aluminium Al 7050-T7451 [74]. Ces résultats sont renforcés par d'autres travaux qui montrent que l'écrouissage superficiel généré par le brunissage améliore considérablement les propriétés mécaniques des matériaux [75].

I.5.3.3. Génération des contraintes résiduelles par déformation plastique

Le brunissage est particulièrement efficace pour améliorer les contraintes résiduelles des matériaux, en générant des contraintes de compression qui jouent un rôle crucial dans la résistance à la fatigue et la performance globale des composants. Ce procédé induit des contraintes résiduelles de compression en déformant plastiquement la surface, ce qui permet de contrer les contraintes de traction responsables des défaillances en fatigue [76].

De plus, l'amélioration des contraintes résiduelles est influencée par des paramètres clés du processus, tels que la force de brunissage, la vitesse et le nombre de passes. Des forces de brunissage plus élevées entraînent une déformation plus profonde et des contraintes de compression accrues [76], [77]. L'ajout de vibrations durant le brunissage permet également d'obtenir des résultats similaires tout en réduisant les forces statiques appliquées, optimisant ainsi l'efficacité du procédé pour l'amélioration des contraintes résiduelles [78].

I.5.3.4. Effet des paramètres du brunissage

Les paramètres du processus, tels que la vitesse de brunissage, la vitesse d'avance, la force appliquée et la profondeur de pénétration, sont essentiels pour obtenir les résultats souhaités. Des études ont montré que les forces de brunissage jouent un rôle clé dans la modification des caractéristiques de surface et l'amélioration des performances tribologiques des matériaux [2], [60], [74].

Des recherches, comme celles de S. Swirad [79], démontrent que les paramètres de brunissage, tels que la force appliquée et le nombre de passes, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la résistance à la fatigue des matériaux. A. Saldana-Robles et al. [80] recommandent l'utilisation de forces élevées, d'une faible vitesse d'avance, et d'un nombre optimal de passes pour maximiser l'intégrité de surface lors du brunissage à bille.

I.5.3.5. Mécanisme d'amélioration de la tenue en fatigue

Le brunissage joue un rôle crucial dans l'amélioration de la résistance à la fatigue des matériaux en introduisant des contraintes résiduelles de compression à la surface. Par exemple, R. Avilés et al. ont démontré que le brunissage induisait des contraintes résiduelles de compression de -600 MPa, réduisait la taille des grains dans les couches superficielles de 50 % et augmentait la dureté de surface de 25 %, ce qui améliorait la performance en fatigue de l'acier AISI/1045 [81].

De même, K. Zay et al. ont révélé que le brunissage était plus efficace que le grenailage pour améliorer la tenue à la fatigue de l'alliage TIM 54M [82]. Maximov et al. ont étudié l'impact des paramètres du brunissage par frottement, montrant que ce procédé augmentait de manière significative la résistance à la fatigue et la durée de vie des composants [83].

En revanche, F. Gharbi et al. ont constaté que bien que le brunissage sur des tôles en acier AISI 1010 ait augmenté la ductilité de 49 %, il n'a pas amélioré la résistance à la fatigue, malgré l'introduction de contraintes résiduelles importantes [84]. Ces résultats soulignent que, bien que le brunissage puisse améliorer la résistance à la fatigue, son efficacité dépend fortement du type de matériau et des paramètres de traitement spécifiques.

I.5.4. Types des outils

Les outils de brunissage par vibration ultrasonique représentent une avancée dans l'amélioration de l'état de surface des pièces métalliques. En combinant l'application mécanique et les vibrations ultrasoniques, ces outils permettent de réduire la rugosité tout en offrant un traitement de surface précis et efficace [64], [65]. Grâce à cette technologie, il est possible d'obtenir des surfaces de haute qualité, adaptées aux exigences de précision des industries modernes.

Dans le domaine du brunissage, il existe une diversité d'outils spécialement conçus pour améliorer l'intégrité de surface des composants métalliques. Ces outils varient en fonction de leur géométrie, de leur matériau de fabrication, et de leur mode d'application. Ils sont utilisés

pour traiter une large gamme de matériaux, offrant des finitions de surface spécifiques et répondant aux exigences particulières en termes de résistance à la fatigue et de durabilité.

I.5.4.1. Outil à Réglage par Ressort

Les deux dispositifs de brunissage présentés intègrent un réglage à ressort, bien qu'ils soient conçus pour des applications distinctes. Le premier dispositif, illustré dans la Figure I.18a, utilise un ressort pour ajuster la précharge et maintenir une pression constante sur les billes de brunissage, permettant ainsi un brunissage efficace de surfaces planes ou de révolution avec une interchangeabilité rapide des outils [85].

Le second dispositif, représenté dans la Figure I.18b, emploie un ressort pour régler la force de brunissage et permet également de modifier l'inclinaison de l'indenteur cylindrique selon un angle α par rapport à la surface traitée. Chaque dispositif utilise le ressort pour optimiser le traitement, mais répond à des besoins spécifiques dans le processus de brunissage [60].

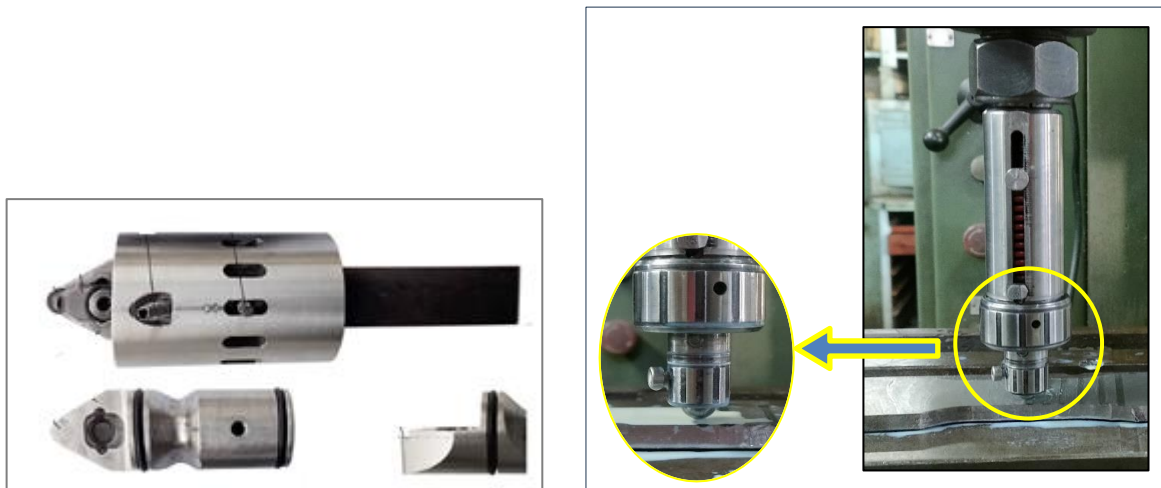


Figure I.18. Dispositifs de brunissage avec réglage à ressort. a) Dispositif à têtes interchangeables avec précharge réglable par ressort ; [85], b) Outil avec réglage de l'inclinaison et de la force de brunissage à l'aide d'un ressort [60].

I.5.4.2. Brunissage Assisté par Vibrations Ultrasoniques (UVABB)

Le brunissage assisté par vibration ultrasonique combine la déformation plastique mécanique et les vibrations ultrasoniques pour optimiser le traitement de surface, selon le principe d'acoustoplastie [86]. En intégrant des vibrations à la force de précharge, cette méthode réduit efficacement la rugosité et améliore la dureté de surface. Les paramètres clés, comme le nombre de passes et la force appliquée, influencent la qualité obtenue. La figure I.19 illustre

cette synergie entre vibrations ultrasonores et brunissage, offrant une avancée prometteuse pour les procédés de fabrication [64], [86].

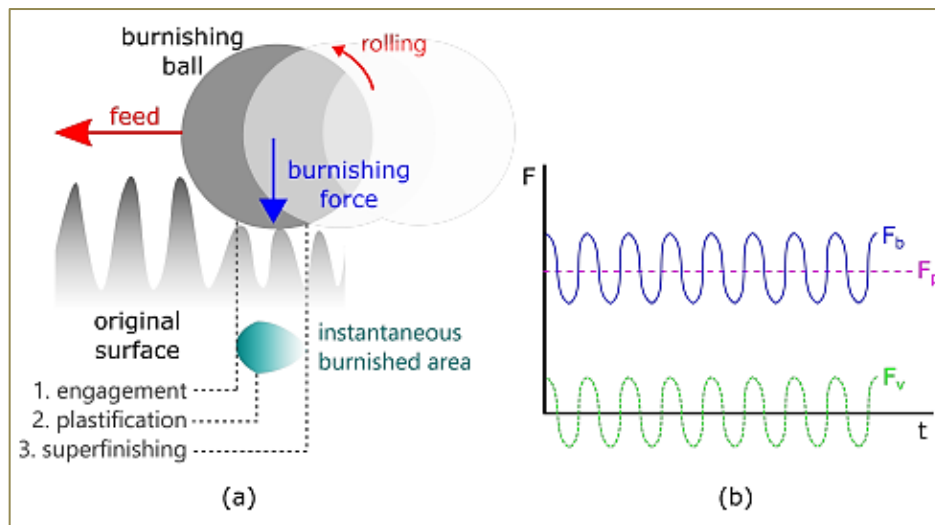


Figure I.19. : (a). Vue d'ensemble d'un processus de brunissage à billes assisté par vibration. (b). Composantes de la force de de la force de brunissage (F_b) [86].

Par rapport au brunissage non assisté (NVABB), le VABB offre une réduction plus significative de la rugosité, comme illustré dans la figure I.20, avec une efficacité influencée par les paramètres de brunissage [86].

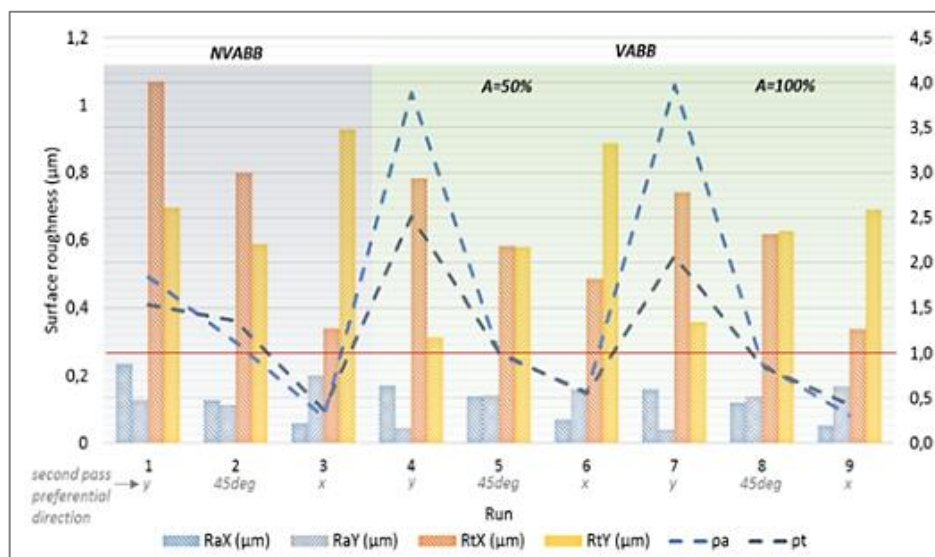


Figure I.20. Effet du brunissage par ultrasons par vibration sur la rugosité : a) Les parties en bleu montrent la rugosité moyenne, b) Les barres orange représentent la rugosité totale [86].

La figure I.21 présente un exemple d'outil de brunissage assisté par vibrations ultrasoniques, conçu pour garantir un contrôle précis des forces appliquées. Des outils

spécialisés permettent ainsi de répondre aux exigences des matériaux complexes et des pièces à géométrie particulière [87], [88].

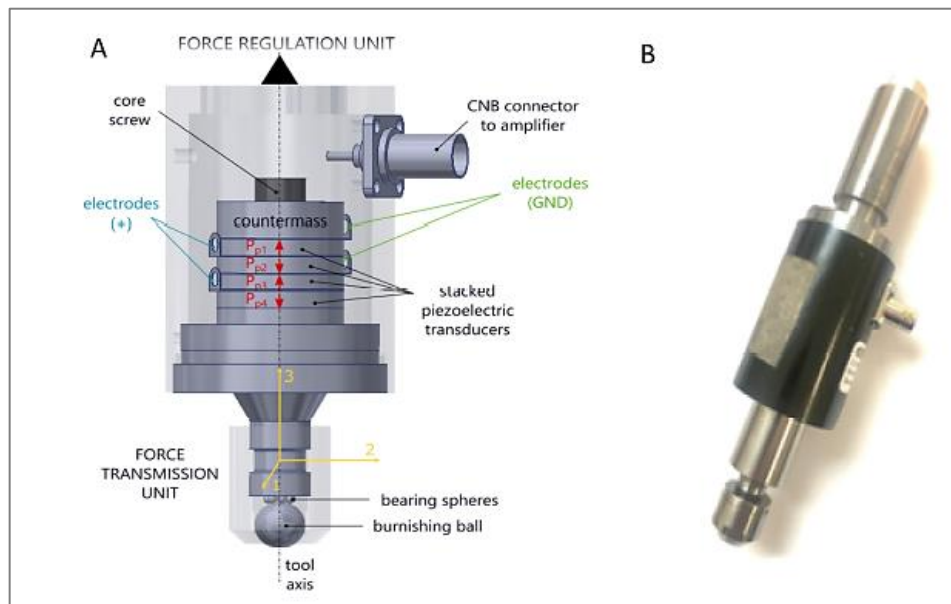


Figure I.21. Outil de brunissage à bille UVABB avec système de déplacement linéaire 1D : (a) Schéma du système piézoélectrique ; (b) Prototype utilisé pour le suivi des vibrations [87].

I.5.5. Les paramètres clés du brunissage

Le brunissage est influencé par plusieurs paramètres essentiels qui déterminent son efficacité et ses effets sur l'intégrité de surface. Parmi ces paramètres, la vitesse de rotation joue un rôle significatif en améliorant la qualité de surface et la dureté du matériau [80]. L'avance, quant à elle, impacte directement la rugosité tout en favorisant une augmentation de la microdureté [5]. Le nombre de passes constitue également un facteur clé : une augmentation progressive améliore la finition jusqu'à atteindre un seuil optimal, au-delà duquel les résultats deviennent stagnants ou négatifs [89]. La force de brunissage est un autre paramètre déterminant, permettant de générer une déformation plastique contrôlée tout en évitant les contraintes résiduelles indésirables susceptibles d'altérer la performance de la pièce [90]. Enfin, le rayon de l'outil influe sur la pression de contact et la finition de surface. Un rayon plus grand tend à améliorer la qualité de surface, bien que cela puisse limiter son efficacité dans des zones étroites [91].

I.5.6. Modélisation et optimisation des paramètres du brunissage

L'optimisation de ces paramètres est essentielle pour atteindre les caractéristiques souhaitées, mais elle doit être réalisée en tenant compte des compromis possibles, comme le risque de surtraitement qui pourrait entraîner des contraintes résiduelles ou des défauts de

surface [92]. Pour optimiser les paramètres du brunissage, différentes approches statistiques et mathématiques ont été largement explorées. Les plans d'expériences, tels que les méthodes de Taguchi, la méthodologie de surface de réponse (SMR) et le plan factoriel complet, ont démontré leur efficacité pour analyser les interactions entre les paramètres du processus et identifier les facteurs prédominants influençant des caractéristiques essentielles, telles que la rugosité, la microdureté et l'intégrité de surface [92]. L'optimisation des paramètres du brunissage a été étudiée sur le Ti-6Al-4V (Rotella), et sur l'acier AISI 1045, en mettant en évidence l'impact des paramètres de brunissage sur la rugosité et la durée de vie en fatigue [93]. Des modèles mathématiques ont été développés pour prédire ces réponses critiques avec précision. Par ailleurs, la logique floue a été utilisée pour modéliser les interactions complexes des paramètres du processus dans le brunissage appliqué aux alliages d'aluminium Al 2014 et Al 6063 [94]]. Ces approches constituent des outils indispensables pour comprendre en profondeur les effets d'interaction et définir des conditions optimales, contribuant ainsi à l'amélioration des performances des procédés de brunissage [93].

I.6. Etat d'art sur le brunissage

I.6.1. Travaux antérieurs sur l'amélioration de l'intégrité de surface par brunissage

Le brunissage réduit efficacement la rugosité de surface, améliorant ainsi la qualité et la finition des composants. En augmentant la dureté superficielle, cette technique renforce la résistance à l'usure et prolonge la durée de vie des matériaux [3], [60]. De plus, le brunissage augmente les contraintes résiduelles et améliore la résistance à la fatigue [61], contribuant à la robustesse des pièces en service.

I.6.2. Résultats expérimentaux rapportés dans la littérature

I.6.2.1. Études publiées sur l'évolution de la rugosité

Le brunissage contribue à la déformation plastique qui reforme la surface en éliminant les irrégularités. En plus d'améliorer l'état de surface, ce traitement renforce la durabilité des pièces en augmentant leur résistance à la fatigue [3], [95]. La figure I.22 montre la variation de la topographie entre les sections tournées et brunies de la pièce. On observe une diminution notable de la rugosité de la surface dans les couches superficielles de la pièce après le brunissage. [96].

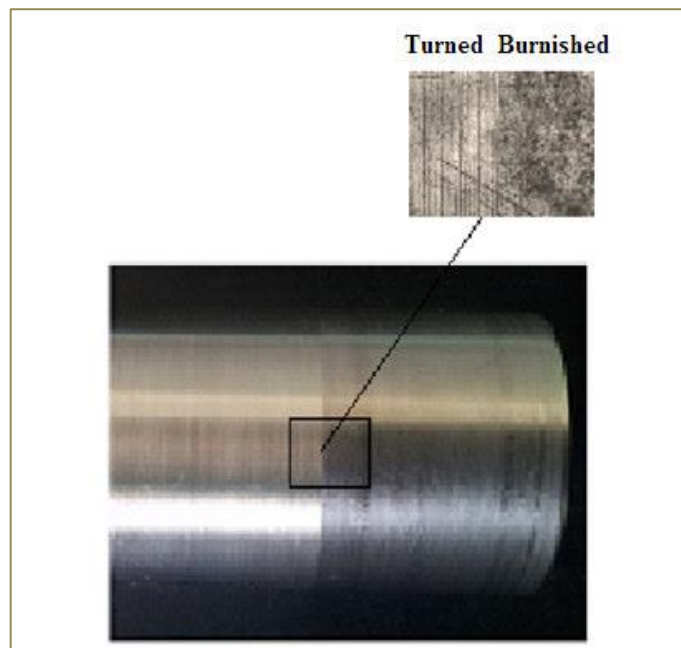


Figure I.22. Images de surfaces tournées et brunies [96]

Les figures I.23 (a-c) montrent que le brunissage a considérablement réduit la rugosité des surfaces par rapport à l'état initial, lissant les profils de surface. Cependant, à des forces de contact plus élevées, des irrégularités périodiques ont été observées, accompagnées d'une asymétrie dans la forme de la surface. Bien que le processus ait efficacement réduit la rugosité, une force excessive peut entraîner des marques de transfert indésirables.

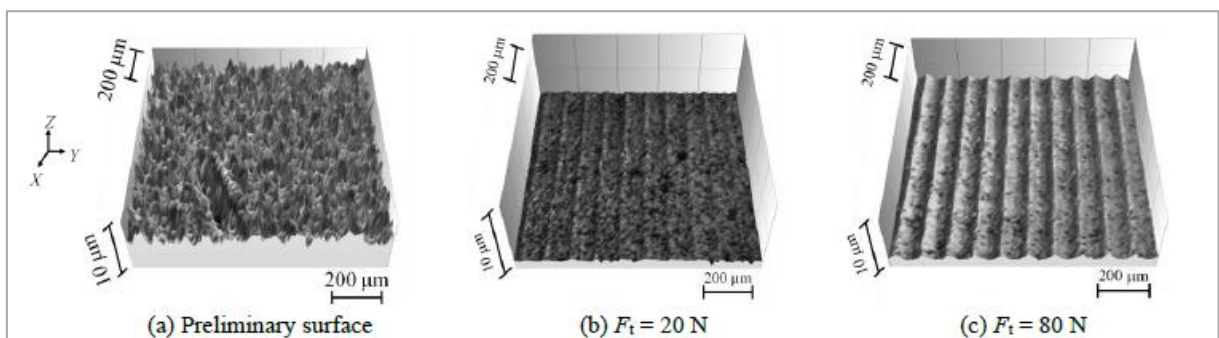


Figure I.23. Profils 3D des surfaces préliminaires et brunies à $F_t = 20$ et 80 N : Lissage des irrégularités à $F_t = 20$ N et apparition d'irrégularités périodiques à $F_t = 80$ N [97].

J. Liska et al. [98] ont appliqué un brunissage au diamant après un tournage dur des anneaux en acier trempé 100C6 et ont conclu que ce traitement améliore la rugosité de surface de 64 % par rapport aux surfaces d'origine.

Dans une étude distincte, Hamadache et al. [99] ont comparé le brunissage à la pointe et le galetage, démontrant qu'une rugosité initiale de $3 \mu\text{m}$ peut être considérablement réduite

grâce à ces procédés. La figure I.24 montre que le galetage offre une finition de surface supérieure par rapport au brunissage à la bille, permettant d'obtenir une finition miroir et de réduire la rugosité de $3,01 \mu\text{m}$ à environ $0,30 \mu\text{m}$ grâce à l'optimisation des paramètres.

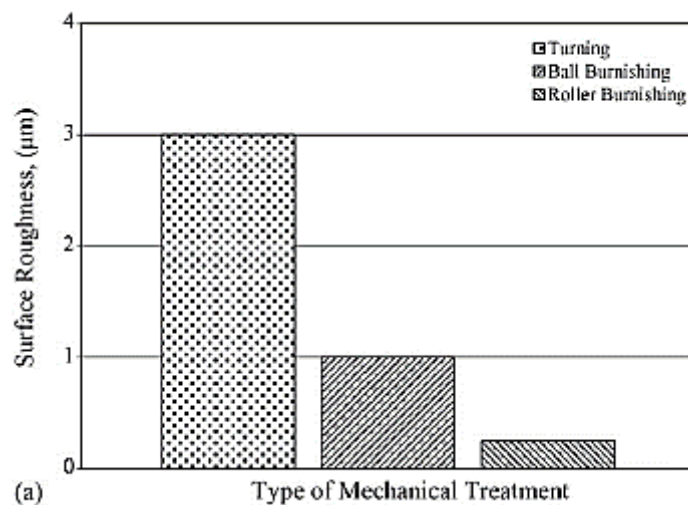


Figure I.24. Effet du traitement mécanique sur : (a) la rugosité et (b) la dureté [99].

I.6.2.2. Études publiées sur l'évolution de la dureté

Le brunissage augmente la dureté de la surface des matériaux [100] en induisant une déformation plastique qui compacte les grains métalliques en surface [101]. Cette densification renforce la structure, augmentant ainsi la résistance de la surface à l'usure et à la fatigue [60][61]. Par conséquent, la dureté superficielle des pièces traitées est considérablement améliorée, ce qui contribue à leur durabilité en service [3].

R. O. Vaishya et al. [102] ont expérimenté un outil de brunissage à insert en carbure de tungstène sur de l'acier Stavax. Ils ont observé une amélioration de la rugosité jusqu'à 45 nm , ainsi qu'une augmentation de la micro-dureté de la surface de 44 à 48 HRC . Une telle finition de surface pourrait améliorer la résistance à la fatigue, jusqu'à sept fois celle du matériau non traité.

Le brunissage par glissement, réalisé avec un outil de brunissage équipé d'une pince rigide à pointe en diamant, améliore non seulement la rugosité de surface mais aussi la dureté des couches superficielles du matériau [3], [61].

I.6.2.3. Résultats expérimentaux sur les contraintes résiduelles.

Le brunissage améliore les contraintes résiduelles en induisant une déformation plastique superficielle qui génère des contraintes résiduelles de compression [2], [3]. Ce traitement augmente ces contraintes résiduelles internes, renforçant ainsi la résistance des matériaux aux

sollicitations mécaniques. En optimisant ces contraintes, le brunissage contribue à améliorer la durabilité et la performance des pièces en service [3], [61].

B. Huang et al. [74] ont montré que le brunissage améliore les contraintes résiduelles dans les pièces en aluminium (Al 7050-T7451). Leur étude révèle une augmentation significative de la dureté superficielle de 220 HV, accompagnée de l'induction de contraintes résiduelles de compression. Ces résultats démontrent que le brunissage renforce les propriétés mécaniques des matériaux en augmentant les contraintes résiduelles, ce qui contribue à une meilleure performance en service.

Maximov et al. [68] ont étudié les effets du brunissage sur des éprouvettes en variant les vitesses de brunissage (Voir Figure I.25). Leur analyse de la distribution des contraintes résiduelles a révélé que les contraintes axiales étaient plus élevées en valeur absolue que les contraintes tangentielles à la surface, bien que ces deux types de contraintes s'égalissent après une profondeur de 220 μm . La zone de compression s'étendait jusqu'à une profondeur de 620 μm .

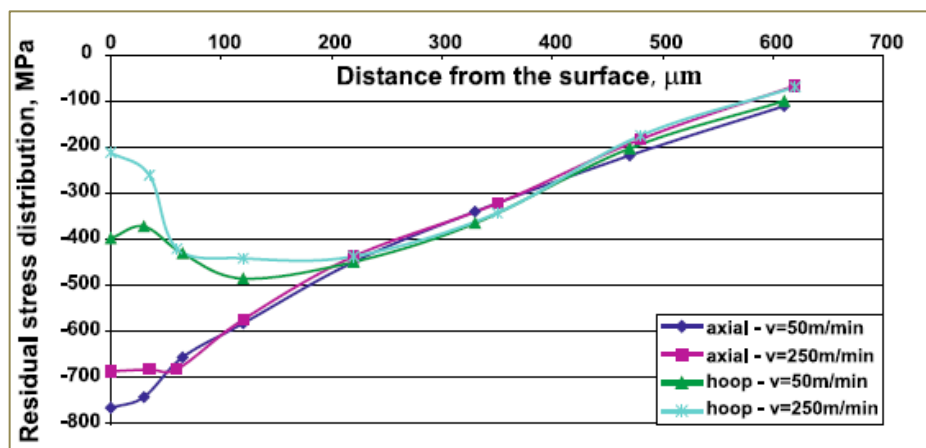


Figure I.25. Distribution des contraintes résiduelles obtenue par analyse de contraintes par diffraction des rayons X de l'acier AISI 316Ti [68].

I.6.2.4. Influences des paramètres du Brunissage sur les propriétés de surface.

Les paramètres de brunissage, tels que la force, la vitesse d'avance et le nombre de passes, influencent fortement l'intégrité de surface [103]. Une force élevée accroît les contraintes résiduelles de compression, renforçant ainsi la résistance à la fatigue [104]. L'ajustement de ces paramètres permet également de réduire la rugosité de surface, minimisant les concentrations de contraintes. L'optimisation de ces facteurs est essentielle pour améliorer la dureté, la tenue en fatigue et la durabilité des pièces.

B. Sachin et al. [105] ont étudié l'effet du brunissage par glissement sur l'intégrité de surface en utilisant un outil cryogénique sur de l'acier inoxydable durcissable par précipitation. Ils ont identifié des conditions optimales de brunissage pour améliorer la finition de surface, observant une diminution de la rugosité avec l'augmentation de la vitesse, de l'avance, et de la force de brunissage. Une diminution initiale de la rugosité a été notée lorsque la vitesse de brunissage augmentait.

Hirota Kato et al.[106] examinent l'effet du rayon de l'outil de brunissage sur la microstructure et la dureté des échantillons traités en acier au carbone. L'utilisation d'une bille de 6,35 mm de diamètre a significativement influencé la déformation plastique des grains, bien que la rugosité initiale n'affecte pas la microstructure de surface. L'étude révèle également qu'une augmentation de la force de brunissage accroît la profondeur de déformation, ce qui impacte la dureté du matériau (Voir figure I.26).

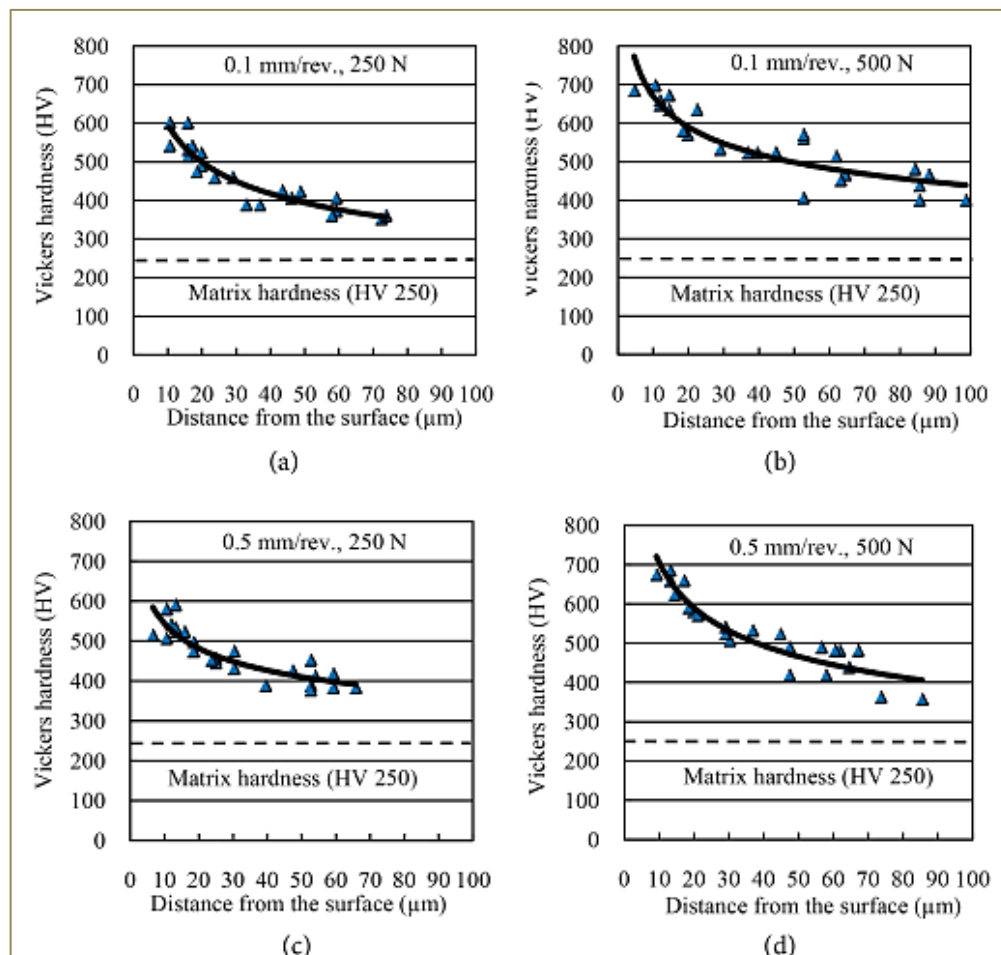


Figure I.26. Profil de dureté Vickers pour différentes conditions de brunissage avec une bille de 6,35 mm [106].

Toutefois, il est important de souligner que les résultats observés dépendent largement d'une combinaison spécifique des différents paramètres de brunissage. Ces paramètres incluent le type d'outil utilisé, le matériau traité, les conditions de travail telles que la vitesse et la pression de brunissage, ainsi que l'état initial des couches superficielles des échantillons.

Chaque paramètre peut interagir de manière complexe avec les autres, influençant ainsi les réponses de sortie comme la rugosité de surface, la dureté [60], [63], et les contraintes résiduelles [106], [107]. Par conséquent, l'optimisation des paramètres nécessite une approche personnalisée pour chaque application afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

I.6.3. Effet du brunissage sur les propriétés mécaniques

I.6.3.1. Études bibliographiques sur la tenue en fatigue

Le brunissage améliore la tenue en fatigue des matériaux en induisant des contraintes résiduelles de compression qui retardent la propagation des fissures. En réduisant la rugosité de surface, il diminue les points de concentration des contraintes pouvant initier des fissures. Ces effets combinés permettent aux pièces brunies de résister plus efficacement aux charges cycliques, prolongeant ainsi leur durée de vie en fatigue [68], [108].

Maximov et al. [68] ont constaté que le traitement par brunissage augmente la résistance à la fatigue de manière notable, avec des améliorations allant jusqu'à près de 40 %, et multiplie la durée de vie en fatigue par plus de 380 fois par rapport à l'état d'usinage initial, comme présenté dans la figure I.27. Ces résultats ont été obtenus sur de l'acier inoxydable au chrome-nickel AISI 316Ti.

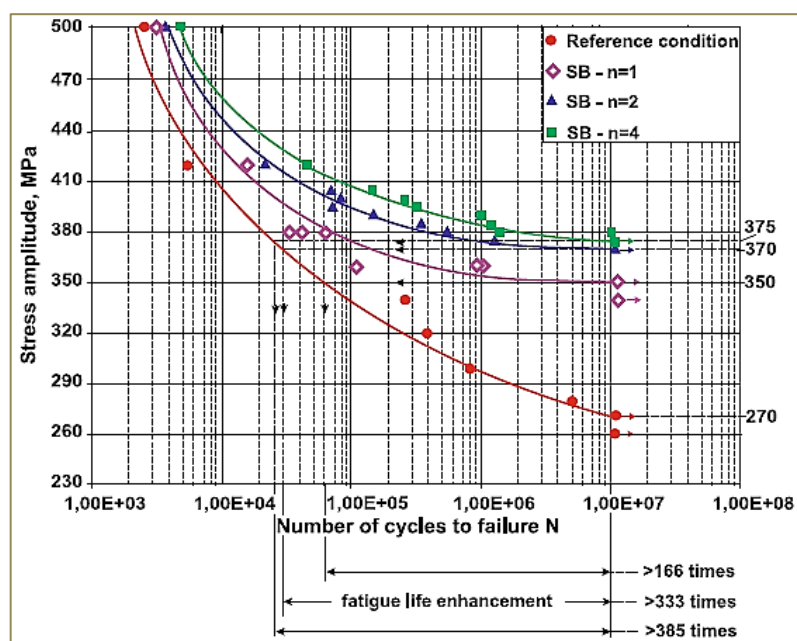


Figure I.27. Courbe de Wöhler. [68]

Le nombre de cycles influence directement la résistance à la fatigue des matériaux. À mesure que le nombre de cycles augmente, des micro-fissures s'accumulent, ce qui peut entraîner des fissures. Les traitements comme le brunissage améliorent cette résistance en induisant des contraintes résiduelles de compression et en augmentant la dureté de surface, retardant ainsi l'initiation des fissures et augmentant le nombre de cycles que le matériau peut supporter avant la défaillance.

V. Chomienne et al. [2] ont réalisé des essais de fatigue sur des éprouvettes en acier inoxydable 15-5 PH, montrant que le brunissage à billes augmente la résistance à la fatigue jusqu'à 25 % grâce à de fortes contraintes résiduelles et à une faible rugosité.

H.Hamadache et al. [108] ont montré que le brunissage (SDB) peut augmenter la limite d'endurance en fatigue par flexion rotative de l'acier XC55 de 30 % par rapport à la rectification et jusqu'à 40 % par rapport au tournage.

I.6.4. Optimisation du brunissage par méthodes expérimentales et numériques

Il est important de noter qu'il existe toujours un optimum du traitement à rechercher pour maximiser l'amélioration de la limite d'endurance. Pour ce faire, les techniques statistiques sont fréquemment utilisées, telles que la planification des expériences basée sur les plans de Taguchi, la méthodologie de surface de réponse (SMR) combinée à la régression linéaire, et l'analyse ANOVA, afin d'optimiser les paramètres du brunissage [64].

P. Senthil [109] a utilisé le réseau orthogonal L_{27} de Taguchi pour optimiser le galetage des alliages Al 2014 et 6063, atteignant une rugosité de $0,52 \mu\text{m}$. Cette approche a permis de déterminer les paramètres les plus efficaces pour réduire la rugosité tout en maintenant une bonne qualité de finition.

C.Y. Seemikeri et al. [110] ont étudié la rugosité, la microdureté et la durée de vie en fatigue de l'acier AISI 1045 à l'aide d'un plan d'expériences factoriel complet. Leur recherche a permis d'obtenir des insights précieux sur l'effet des différents paramètres de traitement sur les propriétés mécaniques du matériau, fournissant des données utiles pour le choix des conditions optimales.

K.R.A. Prasad et al. [111] ont appliqué la méthodologie Taguchi pour optimiser le galetage externe d'une matrice métallique Mg-SiC, obtenant un facteur de désirabilité de 0,99. Cette optimisation a permis d'atteindre des résultats proches de l'idéal en termes de performance du traitement, démontrant l'efficacité de la méthodologie Taguchi pour améliorer les procédés de galetage.

I.7. Conclusion

Ce chapitre a étudié l'influence des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'intégrité de surface et les propriétés des matériaux, en soulignant l'efficacité du brunissage pour améliorer des paramètres clés tels que la rugosité, la dureté et la tenue fatigue. En induisant des contraintes résiduelles de compression. L'optimisation des paramètres de brunissage, comme la force appliquée et la vitesse d'avance, permet d'obtenir une qualité de surface accrue, favorisant une meilleure résistance à l'usure et à la fatigue.

Chapitre II

Matériau et Techniques Expérimentales

II.1. Introduction

Le présent chapitre décrit les moyens expérimentaux employés pour l'étude, incluant la composition et les caractéristiques des matériaux, l'outil de brunissage et les instruments de mesure. Il présente également un plan d'expérience de deuxième ordre, basé sur l'analyse de la variance et la méthodologie de réponse, afin de déterminer les modèles mathématiques qui relient la rugosité et la dureté de surface de l'acier 100C6 aux trois paramètres du régime de brunissage (nombre de passes, avance et force de brunissage). La figure II.1 illustre les objectifs et la structure de l'étude.

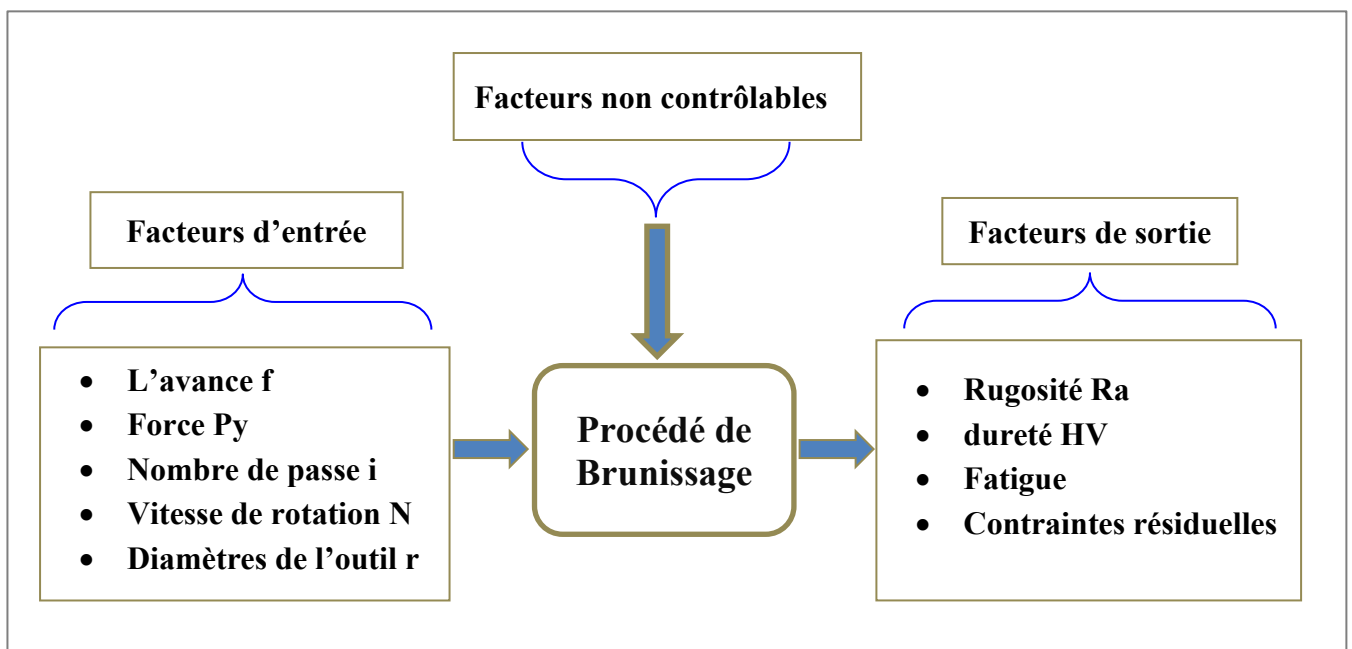


Figure II.1. Facteurs d'entrée et facteurs de sortie de brunissage.

Afin d'atteindre cet objectif, des expériences ont été conduites en utilisant une méthodologie de recherche. Cette approche a nécessité plusieurs étapes, détaillées dans le présent chapitre.

La Figure II.2 présente une vue d'ensemble des essais et des procédures expérimentales effectués dans le cadre de ce chapitre. Elle illustre les différentes étapes des essais réalisés, intégrant les séquences spécifiques de préparation, de test et d'analyse des résultats. Cette figure vise à représenter de manière synthétique et ordonnée les phases clés de l'approche expérimentale adoptée.

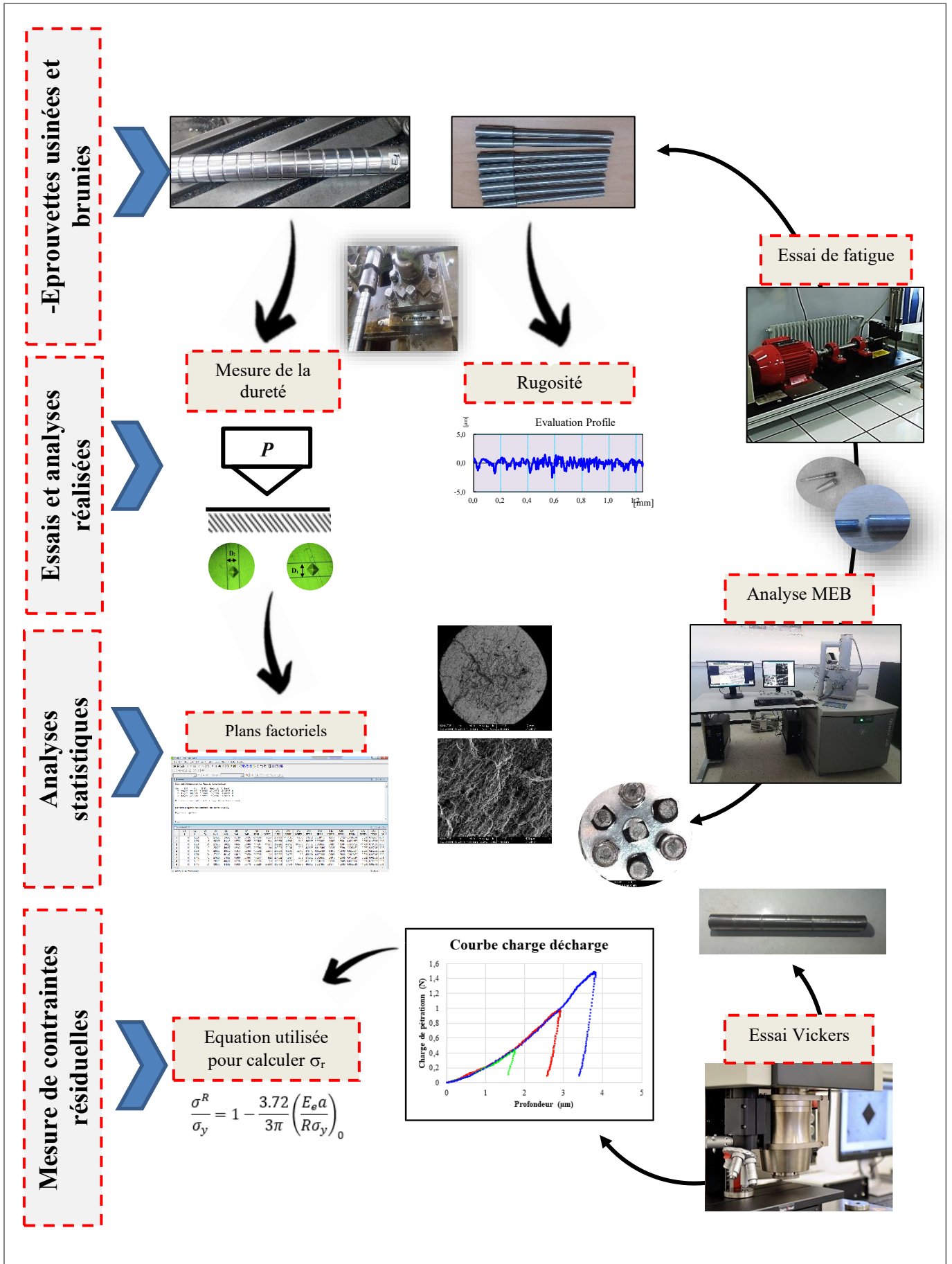


Figure II.2. Illustration des différentes étapes de l'expérimentation.

II.2. Matériau et techniques expérimentales

II.2.1. Matériau

Dans ce travail, le matériau étudié est l'acier 100C6, couramment utilisé dans le secteur des roulements [112]. Cet acier offre une haute dureté, une excellente résistance à l'usure et une stabilité dimensionnelle, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications de roulements, notamment dans le secteur automobile [15]. Les caractéristiques mécaniques du matériau ont été évaluées par un essai de traction réalisé sur une machine de traction modèle ZWICK série 1476. Les échantillons ont été prélevés sur un barreau cylindrique (Tableau II.1).

Tableau II.1 Caractéristique mécanique du 100C6

Propriétés mécanique	Usinage	Brunissage
Limite d'élasticité (MPa)	448.6	458,55
Resistance à la traction (MPa)	701.2	722,85
Allongement (%)	21.67	27.15

La composition chimique de l'acier 100C6 a été déterminée à l'aide d'un spectromètre Oxford PMI-Master Pro. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 Composition chimique de l'acier 100C6

C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ni	Cr	Mo
0,95	0,32	0,24	0,009	0,022	0,087	0,032	0,104	1,395	0,024

II.2.2. Microstructure

L'observation microstructurale (voir Figure II.3) a été effectuée sur un échantillon d'acier traité au Nital, à l'aide d'un microscope optique Nikon ECLIPSE LV 150N équipé du logiciel "NIS-Elements F 4.00".

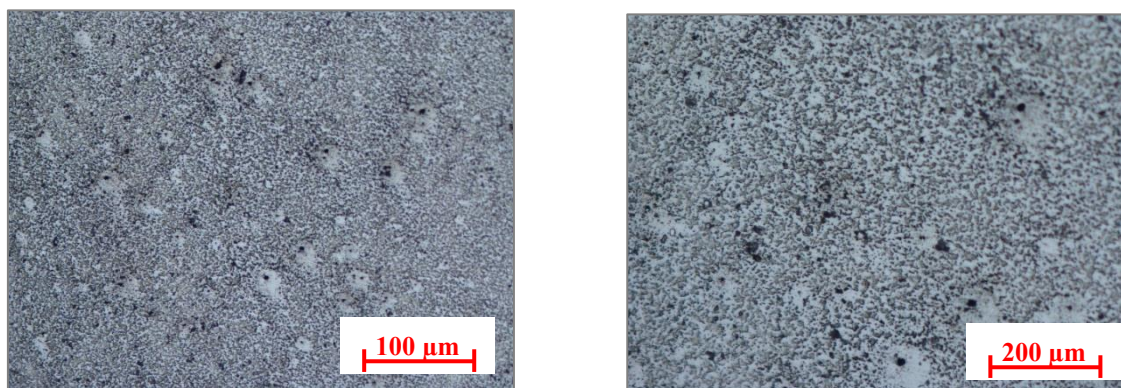


Figure II.3. Microstructures de l'acier 100C6.

L'examen micrographique a révélé la présence de deux phases principales dans cet acier: une phase ferritique, constituant environ 10,42 % du matériau, avec un indice de grains de $G_f=11,8$, et une phase perlitique, représentant environ 89,58 %, avec un indice de grains de $G_p=8,7$.

L'étude a utilisé un microscope optique pour observer la topographie de l'acier 100C6. Les observations ont été effectuées à l'aide du logiciel 'NIS-Elements F 4.00' (Voir figure II.4). Le palier N° 20 a été particulièrement étudié pour examiner l'état de surface de l'acier.

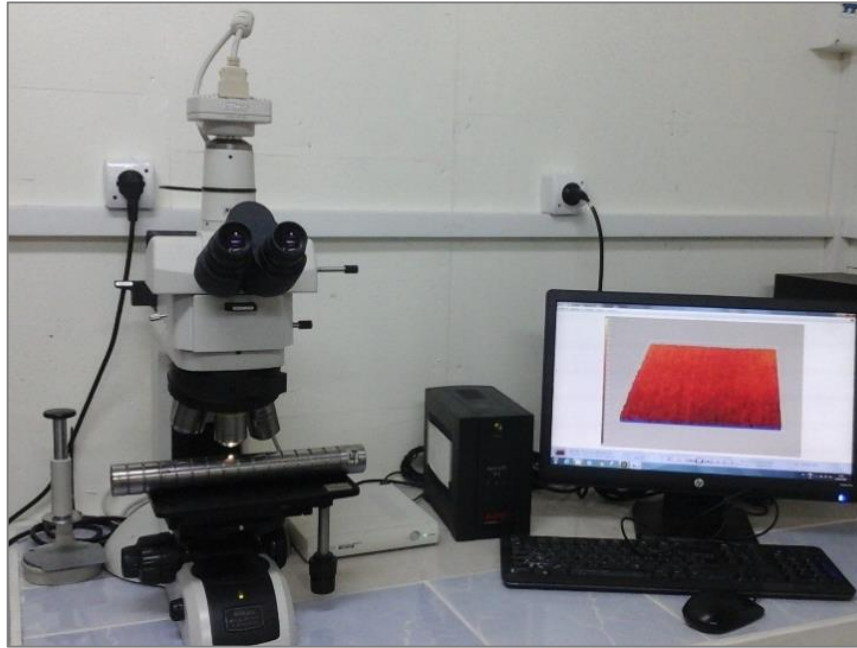


Figure II.4. Microscope optique modèle Nikon ECLIPSE LV 150N.

II.3. Mesure de la rugosité de la surface

Le rugosimètre Mitutoyo modèle SJ-301 a été utilisé pour évaluer la rugosité moyenne (R_a) des échantillons avant et après usinage. Trois mesures ont été effectuées à des emplacements équidistants autour de la circonférence de chaque éprouvette (Voir figure II.5).

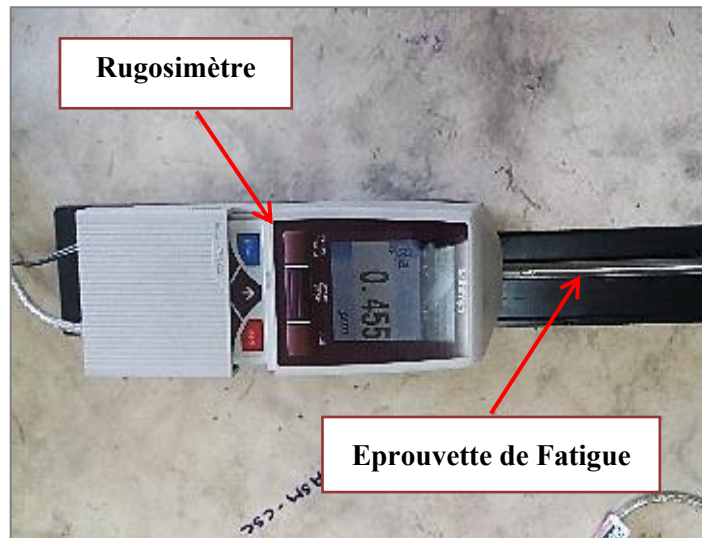


Figure II.5. Mesure de la rugosité réalisées avec Le rugosimètre Mitutoyo SJ-301

II.4. Mesure de la dureté

La dureté a été mesurée à l'aide de l'indenteur Matzuzawa modèle MXT70 sous une charge de 300 gf (Voir figure II.6). Deux types de mesures ont été effectués : la première a concerné la dureté le long du diamètre extérieur, tandis que la seconde a permis de déterminer le profil de dureté sur les couches superficielles de la section transversale de l'échantillon, avec un incrément radial de 0,025 mm.



Figure II.6. Mesure de la dureté réalisées avec l'indenteur Matzuzawa MXT70.

II.5. Méthodologie de surface de réponse (MSR)

La Méthodologie de Surface de Réponse (MSR) a été utilisée pour concevoir et analyser l'expérience. Elle permet d'obtenir un modèle mathématique prédisant les réponses de sortie (Ra et HV) en fonction de la vitesse d'avance (f), du nombre de passes (i) et de l'effort de brunissage (Py). Les niveaux des facteurs d'entrée sont présentés dans le Tableau II.3.

Tableau II.3 Paramètres du brunissage et leurs niveaux

Paramètre	Code	Niveau		
		-1	0	+1
f (mm/tr)	X ₁	0.054	0.074	0.11
i (passes)	X ₂	1	2	3
P_y (Kgf)	X ₃	10	17	24

La relation entre les valeurs réelles et codées de chacun des facteurs d'entrée a été calculée en utilisant l'équation (II.1).

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x} \quad (\text{II.1})$$

Où :

X_i représente la valeur codée du facteur i,

x_i est la valeur réelle du facteur,

x₀ est la valeur réelle correspondant au niveau central,

Δ_x est la demi-amplitude de variation du facteur.

En appliquant cette équation aux trois facteurs étudiés ; la vitesse d'avance f, le nombre de passes i, et l'effort de brunissage Py, les expressions suivantes sont obtenues :

$$X_1 = \frac{f - 0.074}{0.028}, \quad X_2 = \frac{i - 2}{1}, \quad X_3 = \frac{Py - 17}{7}$$

Les essais ont été menés en utilisant le plan factoriel complet, une méthode statistique visant à améliorer la qualité des produits en étudiant l'ensemble des combinaisons des facteurs d'intérêt. L'avantage principal du plan factoriel complet réside dans sa capacité à évaluer simultanément les effets des facteurs et leurs interactions, permettant ainsi une optimisation précise des paramètres du brunissage [113].

Dans le cadre de cette étude, une série d'expériences basée sur un plan factoriel complet a été réalisée. Les échantillons à traiter ont été préparés sous forme de deux barres divisées en paliers (Voir figure II.7). Les paliers sont séparés par des gorges de 2 mm de largeur.

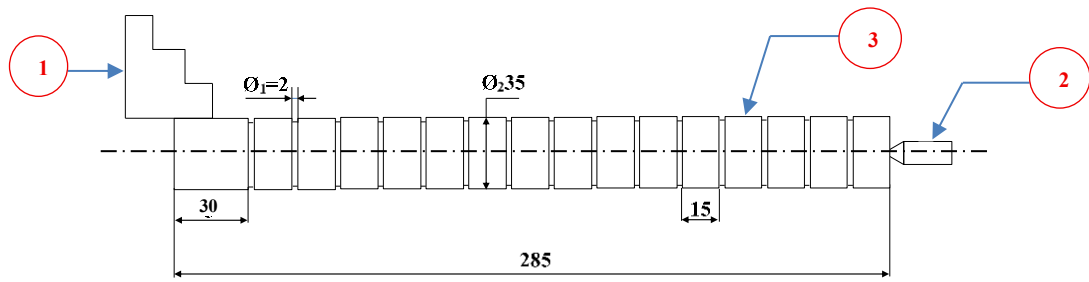


Figure II.7. Eprouvette préparée sur tour.

Le Tableau II.4 résume les résultats expérimentaux issus du plan factoriel complet. Les résultats des expériences ont été recueillis et analysés à l'aide du logiciel statistique Minitab 16. L'analyse de la variance (ANOVA) a permis d'identifier les facteurs les plus significatifs influençant la rugosité et la dureté de surface.

Tableau II.4 Résultats expérimentaux pour un plan (L₂₇).

N°	i	f	P _y	HV _U	HV _B	Ra _U	Ra _B
1	1	0,054	10	246,93	356,60	1,5783	0,1397
2	1	0,054	17	263,77	414,43	1,5733	0,1657
3	1	0,054	24	270,70	368,23	1,4557	0,1403
4	1	0,074	10	250,20	460,97	1,6143	0,1973
5	1	0,074	17	266,60	469,73	1,5877	0,2963
6	1	0,074	24	273,00	461,47	1,4813	0,3650
7	1	0,11	10	276,27	373,57	1,6800	0,6807
8	1	0,11	17	299,90	408,97	1,6793	0,8207
9	1	0,11	24	336,30	412,80	1,6037	0,9770
10	2	0,054	10	247,93	440,70	1,5677	0,2050
11	2	0,054	17	253,70	437,53	1,5413	0,1973
12	2	0,054	24	251,57	394,03	1,4713	0,299
13	2	0,074	10	260,37	499,80	1,5853	0,2333
14	2	0,074	17	258,53	521,57	1,5777	0,2680
15	2	0,074	24	251,53	467,47	1,4940	0,3910
16	2	0,11	10	265,97	429,43	1,5577	0,4793
17	2	0,11	17	279,37	448,13	1,6103	0,6977
18	2	0,11	24	293,53	405,17	1,5330	0,8590
19	3	0,054	10	276,93	525,60	1,483	0,1397
20	3	0,054	17	257,50	511,53	1,5007	0,1230
21	3	0,054	24	236,60	439,43	1,4367	0,3073
22	3	0,074	10	270,20	585,07	1,5417	0,1513
23	3	0,074	17	259,93	561,53	1,5390	0,1783
24	3	0,074	24	242,10	505,03	1,4647	0,3483
25	3	0,11	10	279,67	510,40	1,4197	0,4170
26	3	0,11	17	279,07	491,10	1,4750	0,5630
27	3	0,11	24	269,90	435,17	1,4293	0,7803

II.6. Préparation des éprouvettes avant analyse des faciès de rupture.

Avant d'analyser les faciès de rupture des éprouvettes de fatigue, la zone de rupture a été découpée à l'aide d'une tronçonneuse automatique à abrasif, modèle SERVOCUT 301 – MM (Voir figure II.8).



Figure II.8. Tronçonneuse de type SERVOCUT 301- MM.

II.7. Mesure des contraintes résiduelles

Pour mesurer les contraintes résiduelles, une méthode indirecte couramment employée a été utilisée l'indentation Vickers.

La machine universelle d'essai de dureté ZHU Z2,5 de ZwickRoell, capable de réaliser divers tests de dureté tels que Rockwell, Vickers, Brinell et Martens, a servi pour ce test (Voir figure II.9). Équipée d'une tête de mesure de haute précision (résolution de $0,002 \mu\text{m}$) et du logiciel testXpert, elle assure des mesures précises et adaptées.

Une unité optique avec microscope et lentilles interchangeable facilite le changement de méthode d'essai sans déplacer l'échantillon. Trois charges distinctes (0,5 N, 1 N et 1,5 N) ont été appliquées, avec des cycles de charge et de décharge, permettant de calculer analytiquement les contraintes résiduelles.

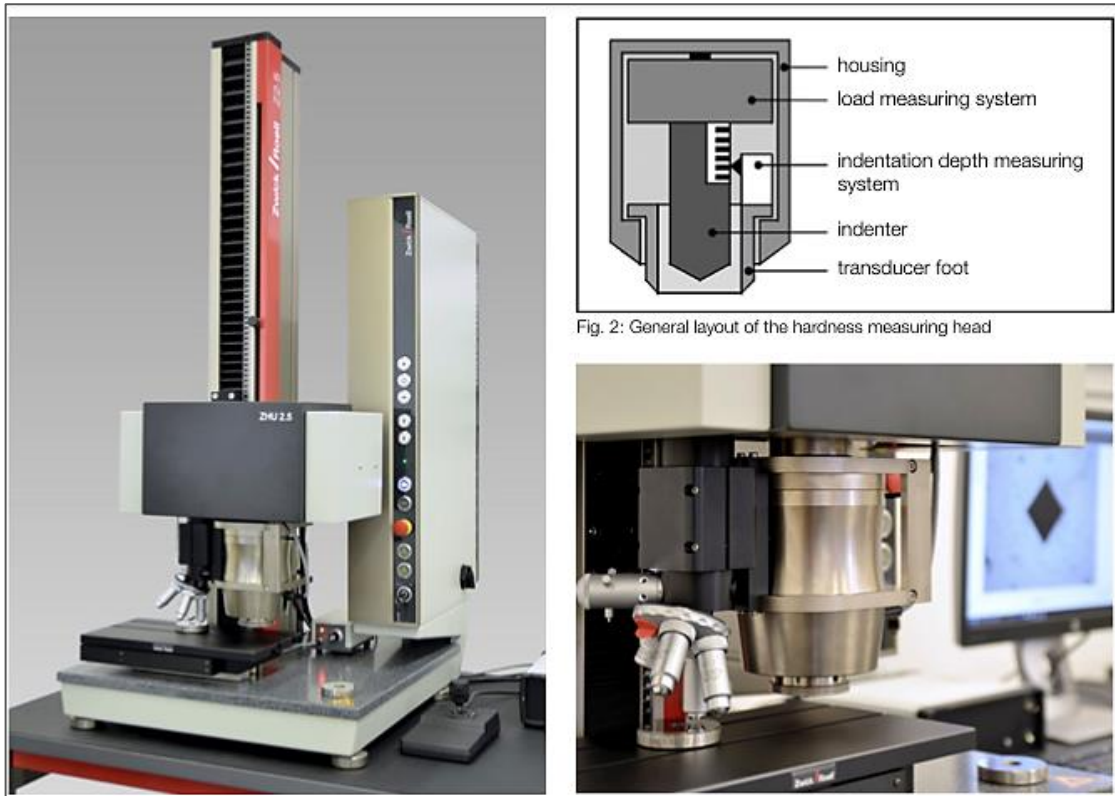


Figure II.9. Machine d'indentation Vickers (ZHU Z2,5 / zwickRoell).

II.8. Procédé de brunissage

L'opération de brunissage est réalisée sur un tour universel 16k20 à l'aide d'un dispositif dont la partie active est une pointe en diamant artificiel (Voir figure II.10). D'un point de vue cinématique, le processus est similaire à une opération de chariotage.

Cependant, la déformation plastique superficielle (DPS) résulte de l'effort de brunissage appliqué par l'outil sur la pièce en rotation, le mouvement d'avance étant assuré par l'outil. Cette opération se distingue par sa simplicité et son coût relativement faible par rapport aux autres opérations de finition par enlèvement de copeaux.



Figure II.10. Tour de brunissage (modèle 16k20).

L'opération de brunissage est réalisée (§ II.5) dans le but de déterminer le régime optimal de brunissage. Ce régime sera ensuite appliqué sur des éprouvettes de fatigue afin d'évaluer l'efficacité du traitement. La Figure II.9 illustre les différentes étapes de l'opération

La rigidité du système Machine-Outil-Pièce (M.O.P) a été vérifiée géométriquement en fonction du rapport l/D de la pièce à usiner (Voir figure II.11). Le brunissage a été réalisé à l'aide d'une pointe en diamant de rayon $r=2.5$ mm et d'une vitesse de rotation de la broche $N=560$ tr/min, sous une lubrification abondante avec une solution aqueuse contenant une huile SAE90.

Les niveaux des facteurs d'entrée (i , f et P_y), dont l'influence sur la rugosité et la dureté est évaluée, ont été sélectionnés conformément aux recommandations de la littérature [114]. Ainsi, différents paramètres de brunissage ont été appliqués sur chaque pièce. Les paramètres opératoires sont résumés dans le Tableau 2

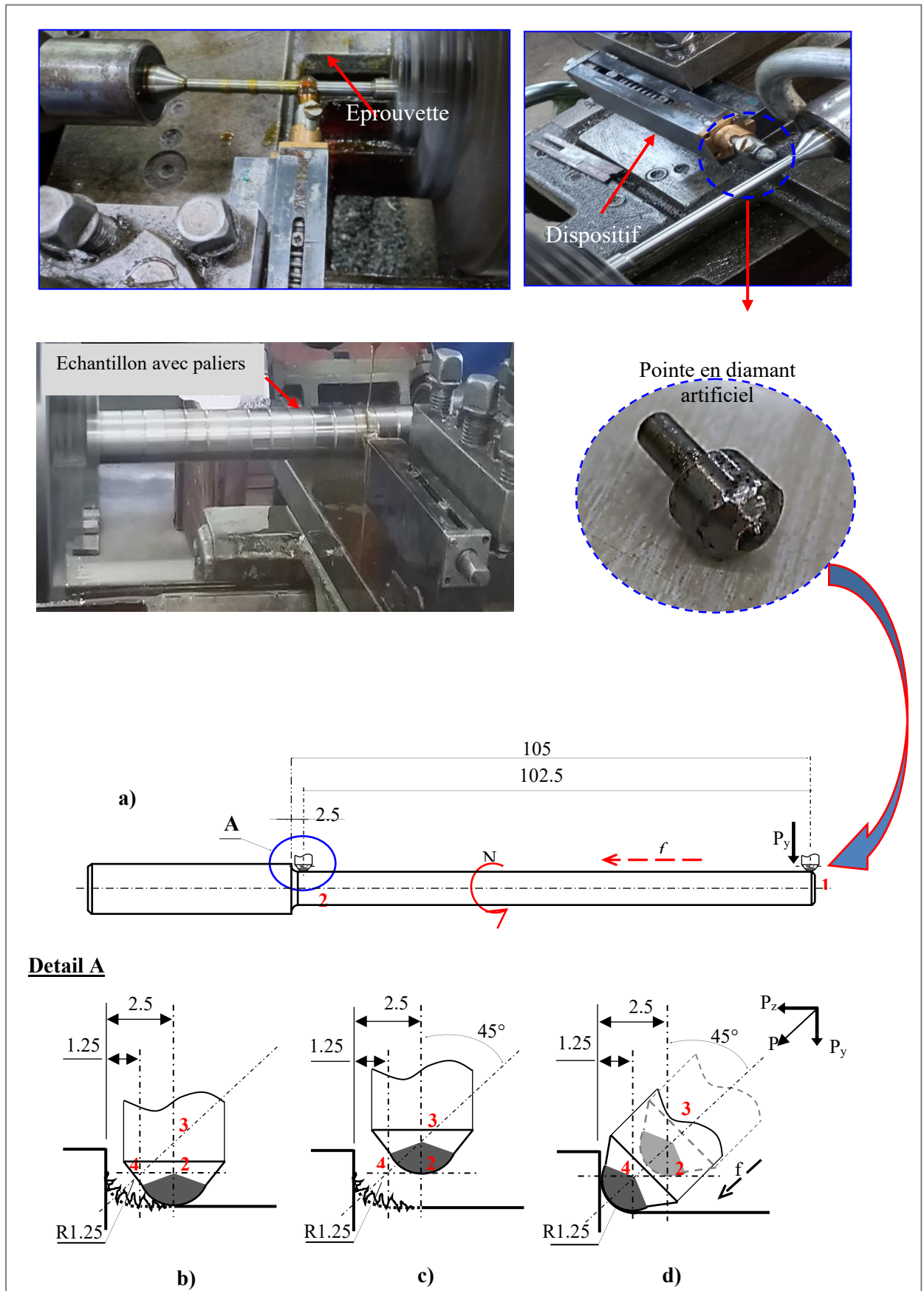


Figure II.11. Principe du procédé du brunissage.

II.9. Essais de Fatigue

Des essais de fatigue en flexion rotative ont été réalisés sur une machine de type « WP 140 », équipée d'une puissance de 0,37 kW et d'une capacité de charge dynamique de ± 300 N. Les données ont été collectées à l'aide d'un amplificateur de mesure intégré, permettant d'enregistrer la sollicitation des éprouvettes ainsi que le nombre de cycles de charge. Ces informations sont ensuite traitées par le logiciel WP 140.20, compatible avec Windows, qui permet une visualisation directe des résultats et la génération des courbes de Wöhler (Voir figure II.12). Tous les essais ont été effectués sous un chargement cyclique ($R = -1$) à température ambiante. Le niveau de contrainte sélectionné correspond à une valeur maximale (σ_{\max}) située soit dans le domaine plastique, soit dans le domaine élastique, voire dans la zone de transition élasto-plastique de l'acier 100C6.

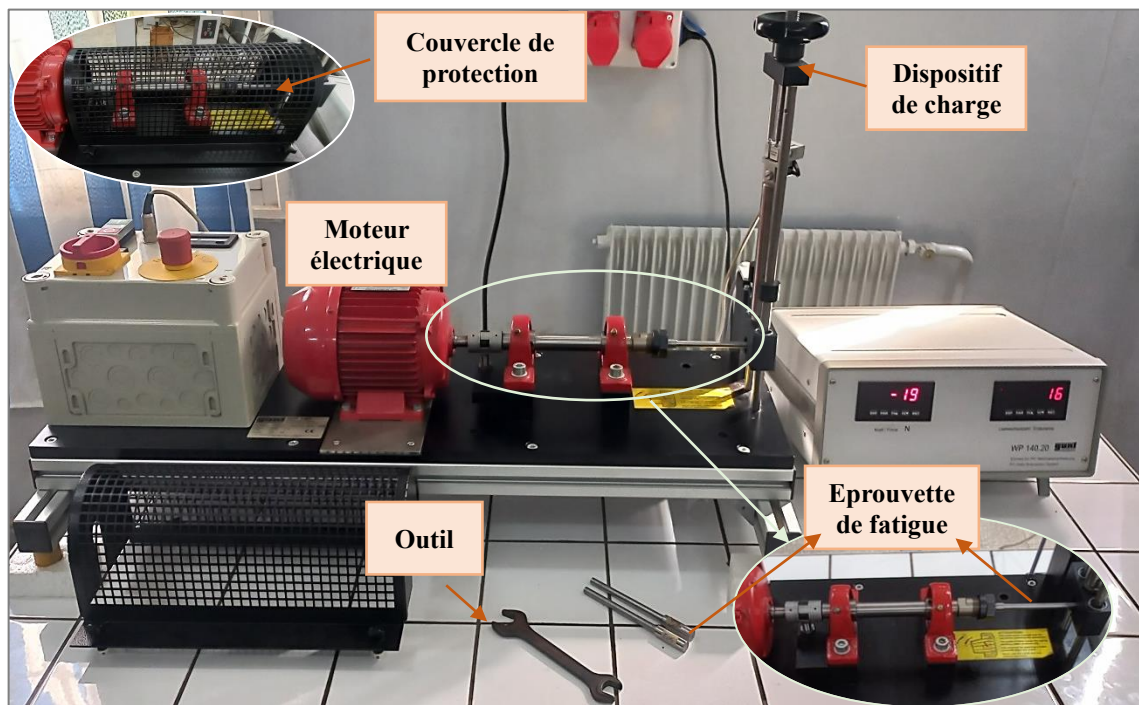


Figure II.12. Essai de fatigue : Machine GUNT Type WP 140.

Pour caractériser la durée de vie et étudier l'influence du brunissage sur la tenue en fatigue de l'acier 100C6, des essais de fatigue ont été réalisés sur différentes éprouvettes cylindriques (Voir figure II.13). Selon les cas, ces éprouvettes ont été soumises à un brunissage dans des conditions optimales ($P_y = 10$ Kgf ; $f = 0,074$ mm/tr et $i = 3$). Ce régime, censé offrir les meilleures réponses en termes de rugosité et de dureté pour une meilleure tenue en fatigue, a été déterminé à l'issue d'une analyse de variance (ANOVA) et de l'utilisation de la fonction de désirabilité (FD).

L'usinage des éprouvettes a été réalisé par tournage conventionnel, en respectant les conditions d'usinage telles que la lubrification et la profondeur de passe. Un contrôle

dimensionnel, incluant notamment le congé de raccordement, sera effectué sur chaque éprouvette avant l'essai.

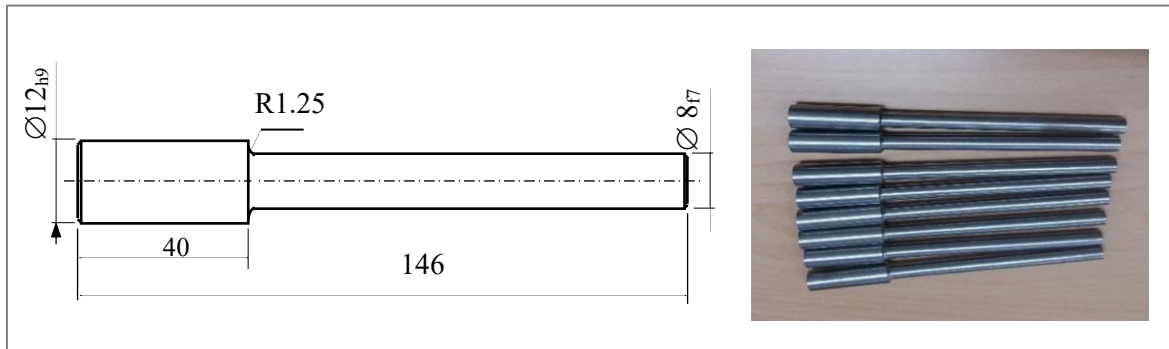


Figure II.13. Epreuves de fatigue en flexion rotative.

II.10. Analyse microscopique des surfaces de rupture

Chaque composant métallique est susceptible de subir une fracture au fil du temps sous l'influence des contraintes environnementales. Seule une analyse précise des surfaces de rupture permet d'identifier les principales causes d'une défaillance, en examinant la structure à la lumière de divers facteurs tels que le procédé de fabrication et les conditions d'utilisation. Cela a conduit à entreprendre une analyse approfondie des différentes caractéristiques des surfaces de rupture des échantillons, qu'ils soient brunis ou non. La caractérisation des surfaces de rupture des éprouvettes traitées par brunissage et usinées a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage QUANTA FEG250 (voir figure II.14).

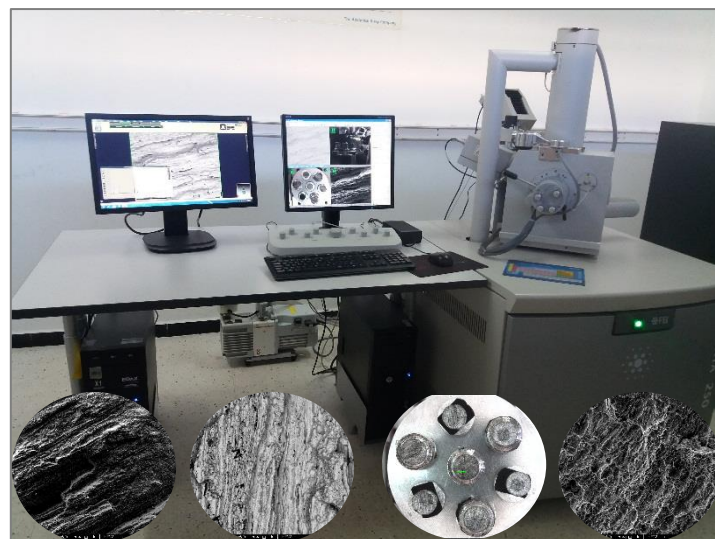


Figure II.14. Microscope électronique à balayage SEM (QUANTA FEG 250).

II.11. Conclusion

Les méthodes expérimentales utilisées pour évaluer l'impact du brunissage sur la surface de l'acier 100C6 ont été détaillées, couvrant le matériau étudié, les outils de brunissage, les instruments de mesure, et les techniques d'analyse, dont la méthode de surface de réponse (MSR). Cette étude a également intégré des essais de fatigue en flexion rotative et une analyse des contraintes résiduelles pour examiner l'influence du brunissage sur la durabilité et la résistance du matériau. Les méthodologies adoptées ont permis d'identifier les paramètres clés du brunissage et leur rôle dans l'amélioration des propriétés de surface. Les résultats expérimentaux, interprétés avec des modèles mathématiques et des outils statistiques, offrent une compréhension approfondie de l'effet du brunissage sur les performances du matériau.

Chapitre III

Optimisation des Paramètres du SDB

III.1. Introduction

Le chapitre se focalise sur l'analyse approfondie de la rugosité de surface et de la dureté, deux critères primordiaux pour caractériser l'intégrité de surface dans les procédés de brunissage. Ces paramètres jouent un rôle clé dans les performances et la durabilité des pièces usinées, notamment en influençant leur résistance mécanique et leur comportement en fatigue. L'étude de la rugosité de surface vise à évaluer l'effet de divers paramètres du brunissage sur la qualité de la finition, tandis que l'analyse de la dureté permet de mieux comprendre les modifications apportées à la texture superficielle de la matière sous l'influence des contraintes mécaniques appliquées par le brunissage. À l'aide d'un plan d'expérience basé sur le plan complet de Taguchi L_{27} et d'une analyse de variance (ANOVA), ce chapitre identifie les facteurs et les interactions significatives entre ces paramètres pour déterminer un régime de brunissage optimal qui maximise la qualité de surface, en obtenant les meilleures valeurs de rugosité (R_a) et de dureté (HV). Cette analyse permet d'optimiser les conditions de brunissage afin d'obtenir la meilleure qualité de surface et d'assurer la reproductibilité du procédé. L'étude repose sur un modèle mathématique prédictif, validé par des coefficients de détermination élevés, qui permet de représenter les relations complexes entre les paramètres du brunissage et les réponses observées. Ainsi, ce chapitre apporte une compréhension plus fine des mécanismes régissant l'intégrité de surface et propose des recommandations pour l'amélioration des processus de brunissage.

III.2. Effets du brunissage sur l'intégrité de surface

III.2.1. Effet du brunissage sur la rugosité

Une analyse préliminaire des résultats révèle que la technique de brunissage par glissement améliore significativement la rugosité par rapport au tournage conventionnel. Cette amélioration s'observe à travers tous les régimes de brunissage examinés. Le meilleur résultat a été obtenu avec une force de brunissage de 10 kgf, une avance de 0,074 mm/tr et 3 passes, où la rugosité initiale (R_a) de 1,536 μm a été réduite à 0,123 μm , soit une amélioration d'environ 92 % (Voir figure. III.1). Les observations topographiques ont été réalisées à l'aide du microscope optique Nikon ECLIPSE LV 150N et du logiciel "NIS-Elements F 4.00."

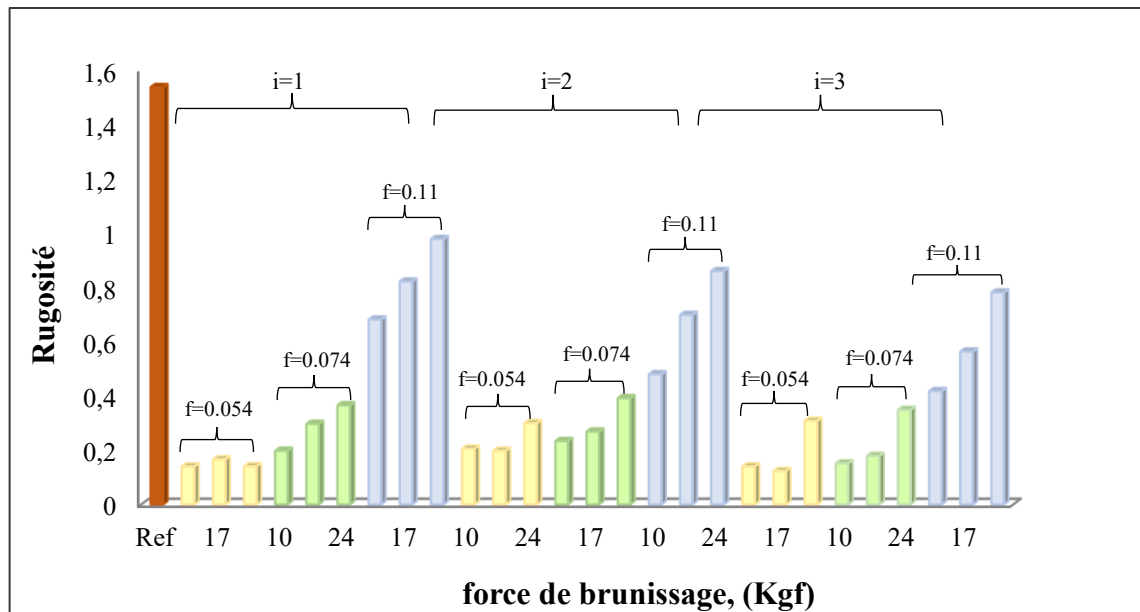


Figure III.1. Effet du brunissage de la Rugosité Ra.

L'observation des surfaces traitées confirme la qualité des résultats obtenus (Voir figure III.2). L'effet positif du brunissage réside principalement dans l'élimination des irrégularités de surface, obtenue grâce à la déformation plastique localisée lors du passage de l'outil. Ce procédé réduit les aspérités en nivelant les crêtes et en comblant les vallées, ce qui améliore l'homogénéité du profil micro-géométrique et l'intégrité de surface.

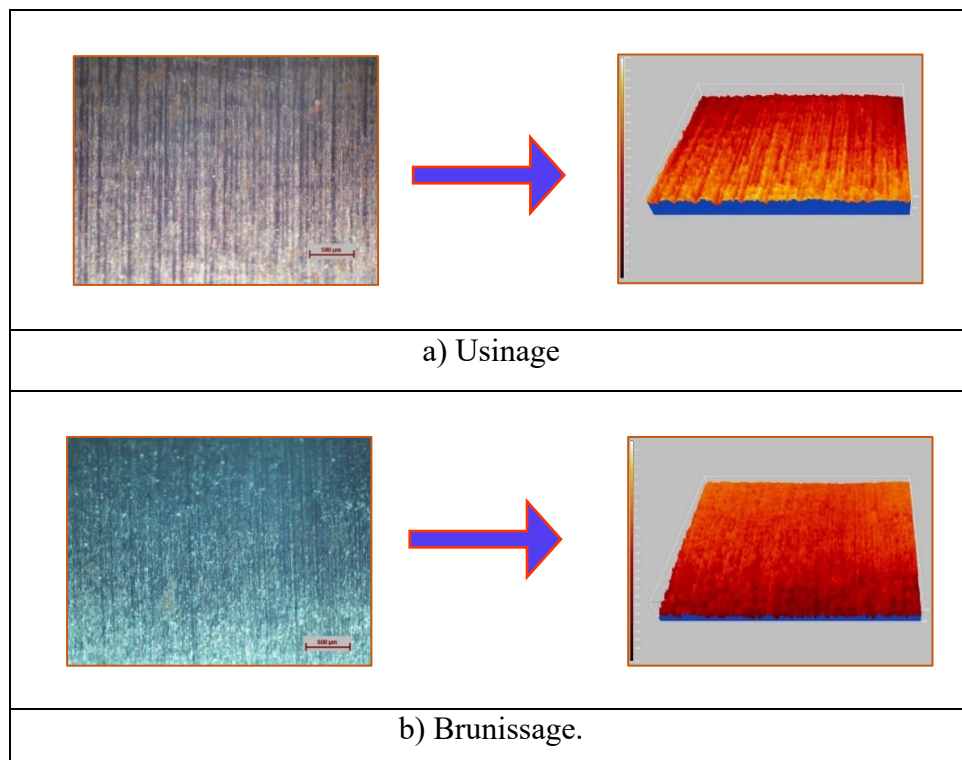


Figure III.2. Topographie de surface de l'acier 100C6.

III.2.2. Effet du brunissage sur la dureté

L'écrouissage des couches superficielles traitées est important pour modifier les propriétés des matériaux et affecte significativement la dureté à différentes profondeurs. Ces modifications mécaniques sont observées jusqu'à une épaisseur d'environ 200 μm à partir de la surface traitée.

Il est essentiel de choisir les paramètres du SDB pour obtenir des améliorations significatives de cette propriété et, par conséquent, des performances globales du matériau. La Figure III.3 illustre l'impact de cette méthode. Avant le traitement, la dureté mesurée après l'usinage initial était de 270 HV. Cependant, grâce à l'optimisation des paramètres de brunissage, cette valeur a augmenté à 585 HV, soit une amélioration de 116,66 %. Ces résultats démontrent l'efficacité de ce procédé pour renforcer les propriétés mécaniques du matériau.

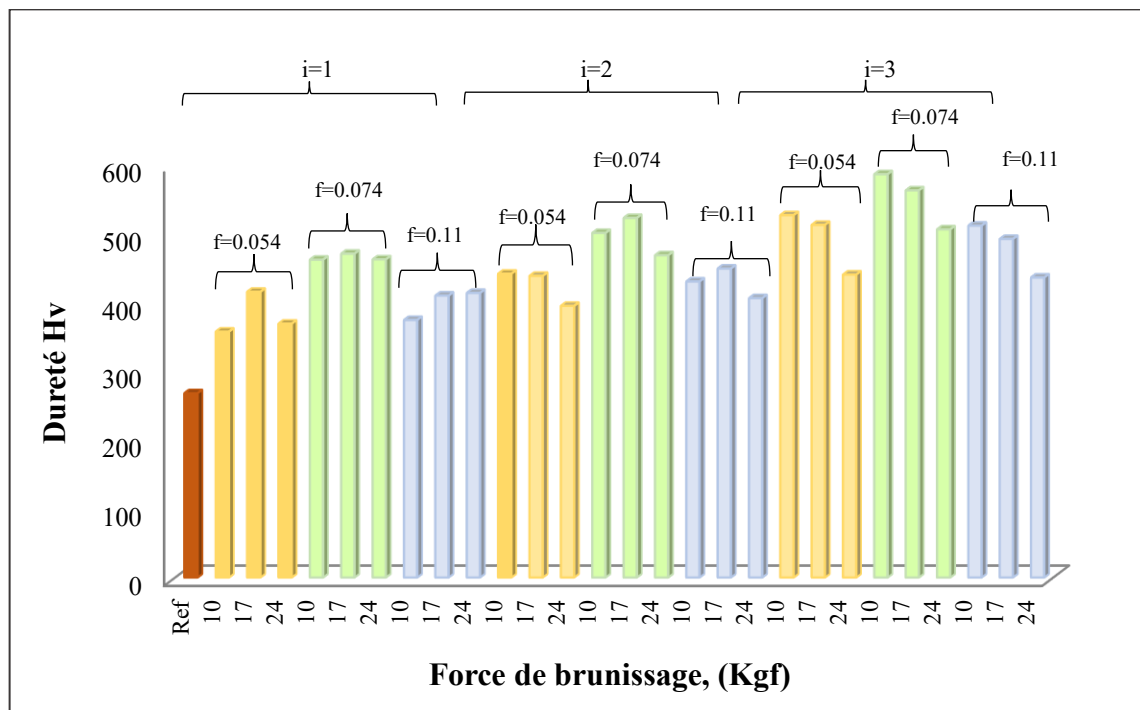


Figure III.3. Effet du brunissage sur la dureté HV.

La Figure III.4 met en évidence l'évolution de la dureté en fonction de la profondeur. Les couches superficielles, soumises aux effets de déformation plastique induite par le brunissage, présentent une dureté élevée qui diminue progressivement avec la distance par rapport à la surface. Cette décroissance reflète l'atténuation des phénomènes d'écrouissage dans les zones plus profondes. Au-delà d'une profondeur de 200 μm , la dureté se stabilise, indiquant une zone où les effets du traitement mécanique cessent d'influencer significativement les propriétés du matériau.

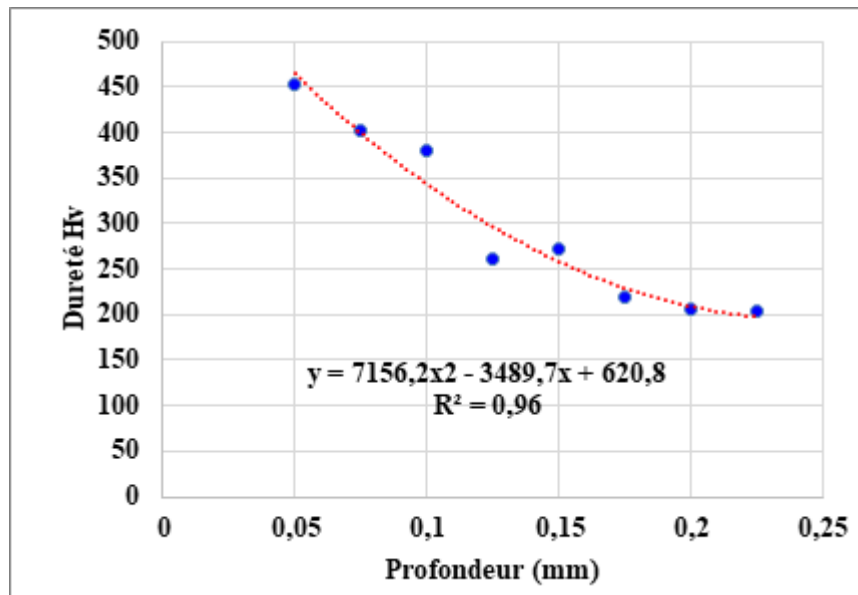


Figure III.4. Evolution de la dureté dans les couches superficielles de l'éprouvette traitée par brunissage.

III.3. Analyses statistiques et modèles mathématiques

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR) permet de dégager une relation entre les variables dépendantes et indépendantes. Une analyse de régression multiple a été utilisée pour développer un modèle polynomial du second ordre représentant les réponses de sortie, afin de comprendre les effets des facteurs d'entrée sur la réponse de sortie ainsi que les interactions entre eux. Cette analyse établit la corrélation entre une variable dépendante continue et des variables indépendantes, qu'elles soient continuées ou discrètes [115]. Le modèle théorique est basé sur les résultats des essais expérimentaux, effectués avec les 3 niveaux des différents facteurs considérés (Tab. III.3). Ce modèle du second ordre peut être exprimé par l'équation (Equation III.1).

$$y = \beta_0 + \sum_{j=i}^k \beta_i x_i + \sum_{j=i}^k \beta_{ij} x_j^2 + \sum_i^{k-1} \sum_j^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{III. 1})$$

Où ε est l'erreur du modèle qui exprime, ou résume l'information manquante dans la régression linéaire des valeurs de y_i à partir des x_{i1}, \dots, x_{ij} et β_0, \dots, β_j sont les paramètres à estimer.

Le tableau d'analyse de la variance permet d'évaluer si les variables explicatives retenues, ainsi que leurs interactions éventuelles, apportent une contribution significative au modèle. Autrement dit, il sert à vérifier si la simple moyenne de la variable à expliquer serait suffisante pour représenter les résultats observés.

Une série de tests statistiques est menée pour juger de la qualité du modèle basée sur :

- L'analyse globale du système ;

- L'étude des coefficients du modèle ;
- L'analyse des résidus.

L'analyse globale du système vise à évaluer la capacité du modèle obtenu à représenter correctement les données, à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA). Pour cela, il est nécessaire de déterminer au préalable plusieurs coefficients d'ajustement permettant de juger la qualité du modèle. [116].

III.3.1. Coefficient de corrélation R^2 :

Ce coefficient de corrélation, noté R^2 , varie entre 0 et 1. Il représente la part de la variabilité des données expliquée par le modèle. Plus sa valeur s'approche de 1, plus le modèle est considéré comme performant. Cependant, une limite du R^2 est qu'il ne tient pas compte du nombre de variables intégrées dans le modèle. Sa valeur est calculée selon l'équation (Équation III.2).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i^n y_i \quad (\text{III. 3})$$

Où n désigne le nombre d'observations.

III.3.2. Coefficient de corrélation ajusté R^2 ajusté (\widehat{R}^2) :

Il s'agit du coefficient de corrélation ajusté, qui corrige le R^2 en intégrant le nombre de variables explicatives utilisées dans le modèle. Cette valeur est déterminée à l'aide de l'équation III.4.

$$\widehat{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} \quad (\text{III. 4})$$

Où :

n : le nombre total d'observations ou d'échantillons dans l'ensemble de données.

p : le nombre de variables indépendantes ou de prédicteurs dans le modèle de régression.

R^2 : le coefficient de corrélation ou le coefficient de détermination, qui mesure la proportion de la variance des données expliquée par le modèle de régression.

III.3.3. Analyse de la variance (ANOVA) :

Le tableau d'ANOVA est un résultat qui permet de voir si on peut considérer que les variables explicatives sélectionnées et leurs éventuelles interactions apportent une quantité d'information significative au modèle ou non. En d'autres termes, c'est un moyen de tester si la

moyenne de la variable à modéliser suffirait à décrire les résultats obtenus ou non. Ce tableau récapitule les paramètres suivants :

- **DDL** est le nombre de degrés de liberté pour le modèle retenu (correspondant à la partie erreur).
- **DDL Modèle** = p
- **DDL Erreur** = n-p-1
- **DDL Totale corrigé** = n-1.

- **La somme des carrés corrigés SCE Totale (SS Total).**

$$SS_{total} = SS_{model} + SS_{erreur} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III. 5})$$

- **La somme des carrés corrigés SCE Model (SS Model) :**

$$SS_{model} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III. 6})$$

- **La somme des carrés corrigés SCE Erreur (SS Erreur) :**

$$SS_{erreur} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{III. 7})$$

- **Le carré de l'écart moyen résiduel de l'erreur :**

$$MS_{erreur} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{p} \quad (\text{III. 8})$$

- **Le carré de l'écart moyen résiduel du modèle :**

$$MS_{model} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1} \quad (\text{III. 9})$$

- **Test de Fisher :**

Le test de Fisher mesure le rapport entre la variance de la variable dépendante expliquée et non expliquée par le modèle de régression.

$$F = \frac{MS_{model}}{MS_{erreur}} \quad (\text{III. 10})$$

- **Test de Student :**

La statistique t permet de tester l'hypothèse (nulle) selon laquelle la valeur des coefficients de régression ne sont pas significativement différents de 0 (en d'autres termes, qu'il existe bien une relation entre la variable dépendante et la variable indépendante en question). La valeur que doit atteindre le test de Student pour que l'on puisse rejeter l'hypothèse nulle dépend du nombre d'observations et du niveau de confiance recherché (de 90% à 99% en général).

- **P-Value** : P-Value donne la probabilité que le coefficient de la variable soit égal à zéro compte tenu de la valeur du test de Student.
- **La contribution** : Le taux de contribution (Cont) de chaque paramètre de brunissage ou de chaque interaction peut être estimé par l'Equation. III.11.

$$Cont = \frac{SCE \text{ du terme}}{SCE_{total}} \quad (III.11)$$

L'ANOVA peut être utilisée pour analyser les influences des paramètres de brunissage sur la réponse de sortie (Ra_B ou HV_B). Elle représente un modèle statistique qui permet de détecter les interactions individuelles de chacun des facteurs d'entrée et leurs interactions. L'analyse ANOVA est exécutée avec un niveau de confiance de 95%.

III.4. Analyse de la variance pour la rugosité

III.4.1. Modèle mathématique

Une analyse de la variance (ANOVA) a été menée afin d'évaluer la contribution statistique des facteurs du brunissage et de leurs interactions sur la rugosité de surface. Bien que certains termes présentent une p-value supérieure au seuil de signification de 5 %, le modèle quadratique complet a été conservé. Ce choix s'appuie sur le respect du principe d'hierarchie des modèles polynomiaux ainsi que sur la nécessité de préserver la cohérence structurelle et la capacité prédictive globale du modèle. Le modèle reliant la rugosité aux paramètres du brunissage est ainsi donné par l'Équation III.12.

$$\begin{aligned} Ra_B = & 0,594457 + 0,206471 i - 14,7687 f - 0,0370219 Py - 0,0260167 i^2 \\ & - 2,50486 i.f + 0,00313452 i.py + 141,35 f^2 + 0,331766 f.Py \\ & + 0,000556122 Py^2 \end{aligned} \quad (III.12)$$

Ce modèle a été validé par un coefficient de détermination $R^2 = 98,60\%$ d'où la bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la rugosité (voir figure III.5).

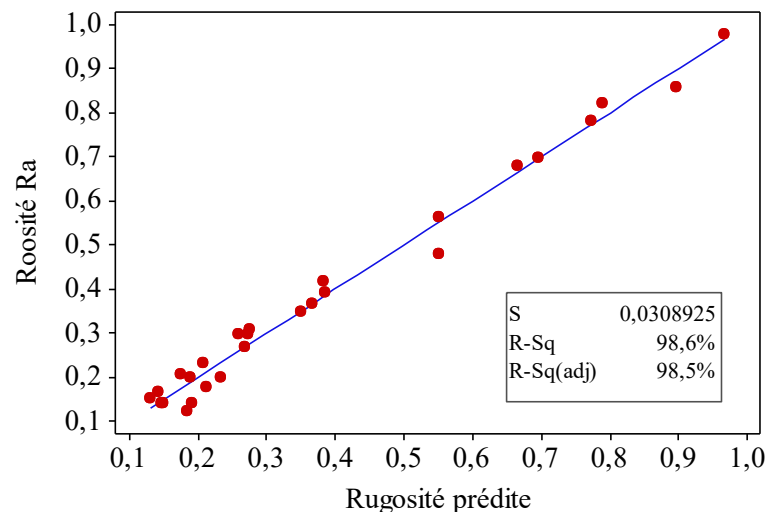


Figure III.5. Valeurs expérimentales et prédites de la Rugosités

La Figure III.6 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus et les valeurs prédites par le modèle concernant la mesure de la rugosité (Ra). Une analyse détaillée de cette représentation met en évidence une similitude significative entre les deux courbes. Cette convergence est d'autant plus remarquable qu'elle témoigne de la capacité du modèle à reproduire avec précision les tendances observées expérimentalement. La concordance entre les données expérimentales et les valeurs prédites souligne la pertinence du modèle dans la description et la prédiction du comportement de la rugosité (Ra).

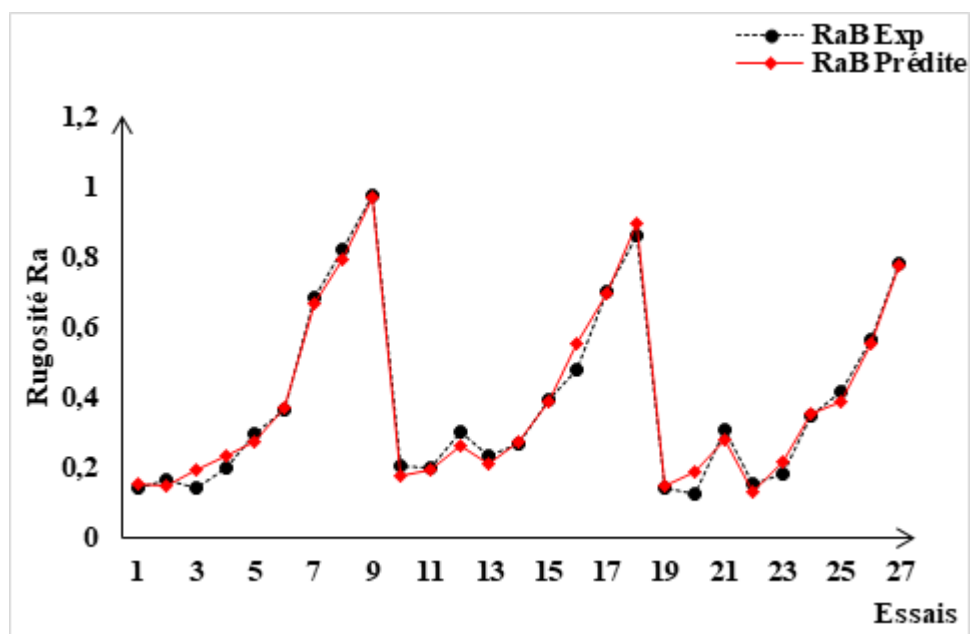


Figure III.6. Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la rugosité.

Le tableau III.1 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) effectuée sur le critère de rugosité (Ra). Cette analyse visait à évaluer l'impact des facteurs principaux ainsi que des interactions sur la rugosité (Ra). Les interactions présentées dans le tableau se révèlent

significatives et sont donc intégrées dans le modèle mathématique, renforçant ainsi la précision des prédictions pour la rugosité.

Tableau III.1 Analyse de la variance (ANOVA) du modèle pour la rugosité Ra.

Source	Ddl	SCE	SCA	CM	Valeur de F	Prob.	Remarque
Regression	9	1,68112	1,68112	0,186791	133,094	<0,0001	-
i	1	0,03333	0,01103	0,011030	7,859	0,0122	Signifiant
f	1	1,27544	0,02131	0,021309	15,183	0,0012	Signifiant
P_y	1	0,18481	0,01351	0,013507	9,624	0,0065	Signifiant
ixf	1	0,06063	0,06063	0,060635	43,204	<0,0001	Signifiant
ixP_y	1	0,00578	0,00578	0,005777	4,116	0,0584	Insignifiant
fxP_y	1	0,05212	0,05212	0,052122	37,138	<0,0001	Signifiant
ixi	1	0,00406	0,00406	0,004061	2,894	0,1071	Insignifiant
fxf	1	0,06050	0,06050	0,060499	43,107	<0,0001	Signifiant
P_yxP_y	1	0,00446	0,00446	0,004455	3,175	0,0926	Insignifiant
Erreur résiduelle	17	0,02386	0,02386	0,001403		-	-
Total	26	1,70498				-	-

III.4.2. Paramètres du SDB et Interactions sur Ra

La figure III.7 illustre comment la rugosité évolue en fonction des différents paramètres du brunissage et de leurs interactions, tel que prédit par le modèle défini dans l'équation III.12. À première vue, il est clair que le brunissage améliore généralement la rugosité, quelle que soit la variation des paramètres du SDB.

La Figure III.7a présente une représentation tridimensionnelle de la rugosité après brunissage (R_{aB}), en fonction du nombre de passages (i) et de l'effort (P_y), pour trois niveaux d'avance différents. Les résultats montrent que, quelle que soit la valeur de l'effort (P_y) ou le nombre de passages (i), une avance de $f=0.054$ mm/tr conduit à la plus faible rugosité (R_{aB}). Cependant, la réduction de la rugosité est plus marquée lorsque $i=1$. En examinant les trois surfaces de réponse, il est évident que l'augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la rugosité en raison de l'élargissement des sillons.

La Figure III.7b présente une représentation de la rugosité de surface estimée (R_{aB}) en fonction des paramètres du brunissage (f et i). On peut observer que la plus faible rugosité peut être obtenue en combinant une avance de 0.054 mm/tr avec n'importe quelle valeur de l'effort (P_y) considérée dans cette étude. Cependant, il est important de noter qu'en utilisant un effort élevé, le brunissage pourrait endommager la surface et perturber sa micro-géométrie. En effectuant uniquement un passage de brunissage, on obtient la meilleure réponse en termes de rugosité de surface (Voir figure III.7c). Cette réponse est d'autant meilleure lorsque l'avance et l'effort du brunissage sont maintenus à leurs niveaux les plus bas.

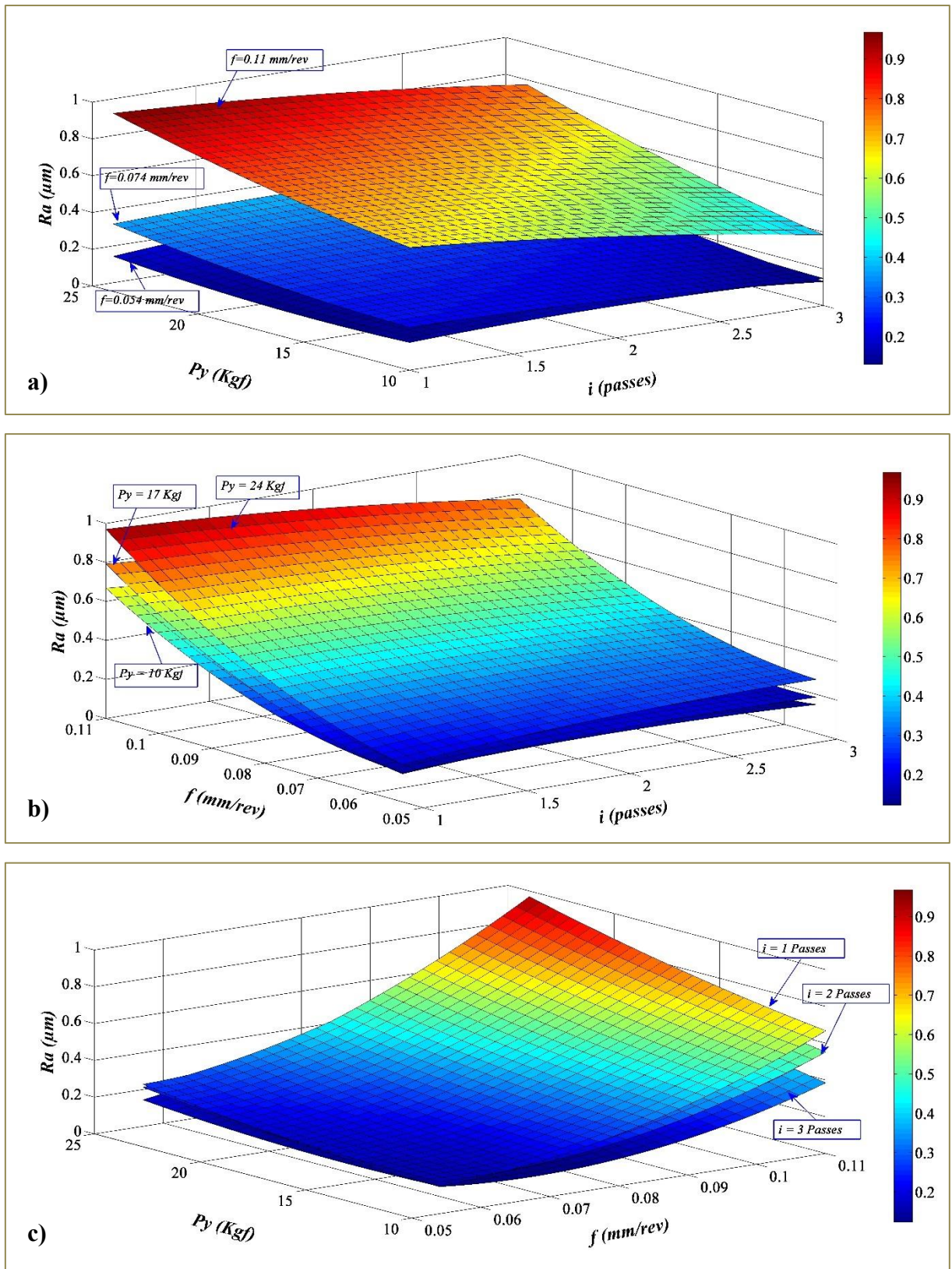


Figure III.7. Variation de la rugosité en fonction des paramètres du brunissage : a) P_y et i , b) f et i , c) P_y et f .

III.4.3. Analyse de la variances Multivariée de la rugosité

Dans cette partie, on concentre l'analyse sur les cartes multivariées afin d'examiner les interactions significatives entre les paramètres de brunissage et leur impact sur la rugosité et la dureté des surfaces traitées. Ces cartes multivariées permettent de représenter graphiquement les relations complexes entre les différents facteurs, en fixant un paramètre tout en faisant varier les deux autres.

Cette approche fournit une compréhension approfondie de l'influence de ces interactions sur les propriétés de surface, ainsi qu'une identification des combinaisons optimales pour améliorer la qualité des pièces usinées. Les résultats de cette analyse offrent des informations précieuses pour optimiser les processus de brunissage en milieu industriel.

III.4.3.1. Carte Multivariée de la Rugosité.

Les Figure (III.4, III. 5 et III. 6) illustrent les cartes multivariées des trois paramètres (i , f et P_y) du brunissage, chacun à trois niveaux, pour la rugosité. On peut remarquer que les trois cartes multivariées fournissent le même régime optimal pour la rugosité.

Ce régime est caractérisé par une avance de 0.054 mm/tr, un nombre de 3 passes et une force 17 kgf. La Figure III. 8 représente la carte multivariée des facteurs i et P_y . Pour chaque panneau représentant un des trois niveaux du facteur f , la rugosité minimale est spécifique à un effort de brunissage donné. La plus faible rugosité est enregistrée pour la faible valeur de la force du brunissage.

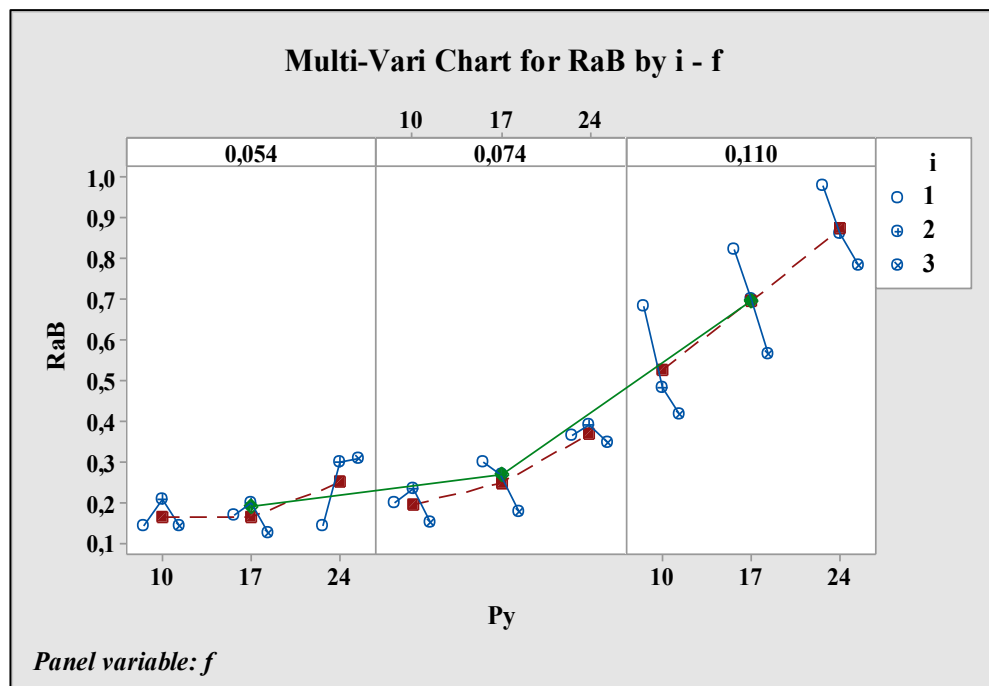


Figure III.8. Illustration graphique des effets des paramètres de brunissage et leurs interactions sur la rugosité (ixf).

Au niveau moyen de ce facteur ($P_y = 17\text{kgf}$), la moyenne de rugosité évolue en fonction de l'avance du brunissage (f). La plus faible moyenne est enregistrée pour le niveau bas de l'avance (f).

De la même façon, la Figure III.9 illustre la carte multivariée pour la rugosité pour les facteurs i et f . Dans chaque panneau de la Figure, la rugosité moyenne évolue en fonction du niveau de l'avance (f). L'écart semble être plus marqué pour le plus haut niveau de l'effort (P_y) notamment entre les niveaux moyens et haut de l'avance (*3^{eme} panneau*).

En fixant l'effort du brunissage à $P_y = 10\text{kgf}$, on remarque que la plus faible rugosité résulte d'une avance de $f = 0.054\text{mm/tr}$ combinée à une ou deux passes. Par contre en augmentant P_y à 17kgf , le minimum de rugosité est également obtenu avec la même avance mais avec un nombre de passes $i = 3$. En imposant un effort de brunissage $P_y = 24\text{kgf}$, le minimum de rugosité est obtenu avec l'avance $f = 0.054\text{mm/tr}$ et seulement une passe.

A une telle force (24 kgf), l'écart de rugosité est plus marqué entre les niveaux moyens et haut de l'avance. Et la moyenne des réponses de R_{aB} est à sa valeur la plus haute.

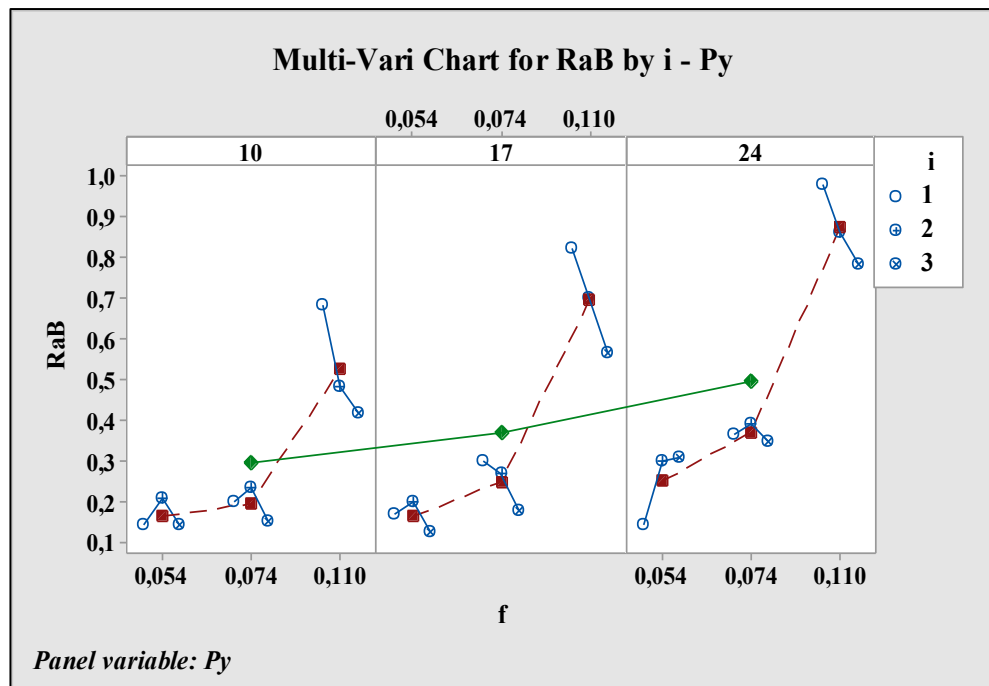


Figure III.9. Illustration graphique des effets des paramètres de brunissage et leurs interactions sur la rugosité ($i \cdot P_y$).

La Figure III. 10 montre la carte multivariée de la rugosité en fonction de l'avance (f) et de la force (P_y) de brunissage. Dans chaque panneau représentant un des niveaux du facteur i , la rugosité augmente avec l'augmentation de l'avance.

Cette augmentation est d'autant plus rapide que l'effort de brunissage est élevé, ce qui indique une interaction entre ces deux facteurs. L'écart de rugosité le plus important est observé dans le premier panneau, où le nombre de passes est minimal ($i=1$) et la force de brunissage maximale ($P_y=24$ kgf). Dans chaque panneau associé au facteur (i), la rugosité moyenne augmente également avec P_y .

La pente est particulièrement marquée dans le troisième panneau (pour $i=3$) entre les niveaux moyen ($P_y=17$ kgf) et élevé ($P_y=24$ kgf) de la force de brunissage. Dans ce même panneau ($i=3$), on observe, d'une part, une faible rugosité pour une force de brunissage de 17 kgf et une avance de 0,054 mm/tr, et, d'autre part, la plus faible moyenne de rugosité lorsque cette force de 17 kgf est combinée avec différents niveaux des autres facteurs de brunissage (f et i).

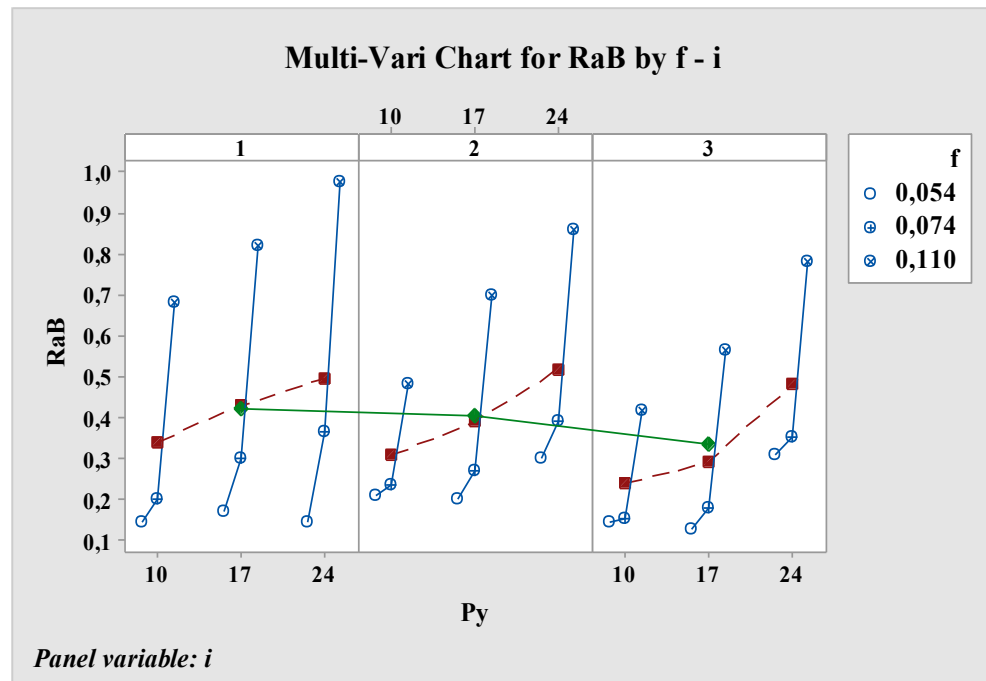


Figure III.10. Illustration graphique des effets des paramètres de brunissage et leurs interactions sur la rugosité ($f \times P_y$).

III.4.3.2. Contributions des Paramètres et de leurs Interactions sur Ra

La Figure III.11 offre une représentation visuelle des conclusions concernant le coefficient de contribution pour la rugosité. Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) mettent en évidence que l'avance du brunissage est le facteur exerçant l'influence la plus marquée, avec une contribution de 79 %.

De manière moins significative, la force de brunissage intervient avec une contribution de 11 %. Quant aux interactions entre les facteurs, l'interaction entre le nombre de passe et

l'avance ($i \times f$) se distingue par une contribution notable de 4 %. L'ANOVA révèle également de faibles contributions provenant de diverses autres interactions entre les différents facteurs.

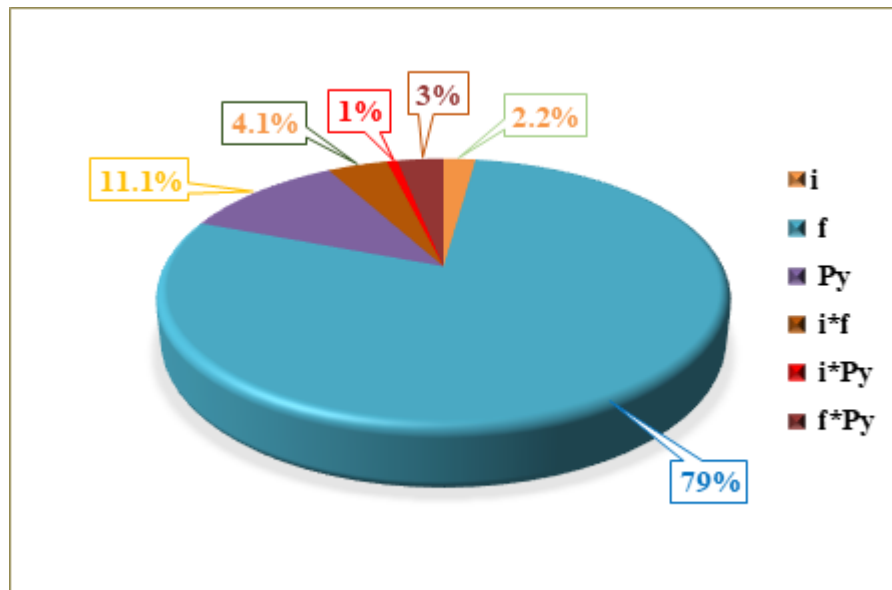


Figure III.11. Taux de contribution des paramètres du brunissage et leurs interactions sur la rugosité.

III.5. Analyse de la Variance de la dureté H_v

III.5.1. Modèle mathématique

L'analyse de la variance (ANOVA) appliquée à la dureté a permis d'examiner l'influence statistique des paramètres du brunissage ainsi que de leurs interactions. Malgré la présence de certains termes associés à une p-value supérieure à 5 %, la structure complète du modèle quadratique a été maintenue afin d'assurer sa cohérence mathématique et sa stabilité prédictive. L'Équation (III.13) représente ainsi la relation fonctionnelle entre la dureté et les paramètres opératoires du brunissage.

$$\begin{aligned}
 H_{v_B} = & -425,622 + 81,2432 i + 16190,8 f + 20,1689 Py + 11,3317 i^2 \\
 & - 261,583 i.f - 3,48571 i.Py - 97999,8 f^2 + 26,8939 f.Py \\
 & - 0,519388 Py^2 \quad \quad \quad (III.13)
 \end{aligned}$$

Ce modèle a été validé par un coefficient de détermination $R^2 = 98,41\%$ d'où la bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la dureté (Voir figure III.12).

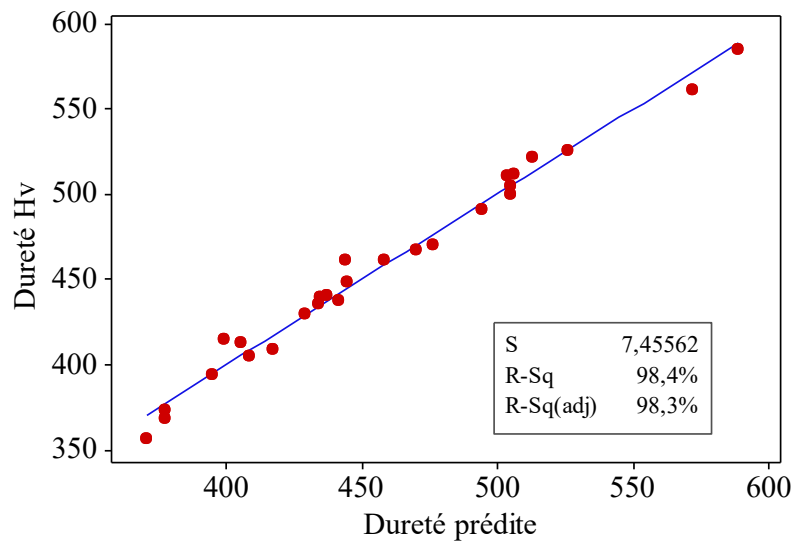


Figure III.12. Valeurs expérimentales et prédites de la Dureté

La Figure III.13 présente une analyse comparative des résultats expérimentaux obtenus et des valeurs prédites par le modèle pour la dureté (Hv). Cette représentation révèle une concordance significative entre les valeurs expérimentales et celles prédites par le modèle. Cette correspondance renforce la robustesse et la fiabilité des prévisions générées, démontrant la capacité du modèle à saisir et à expliquer les variations observées dans les données expérimentales de dureté.

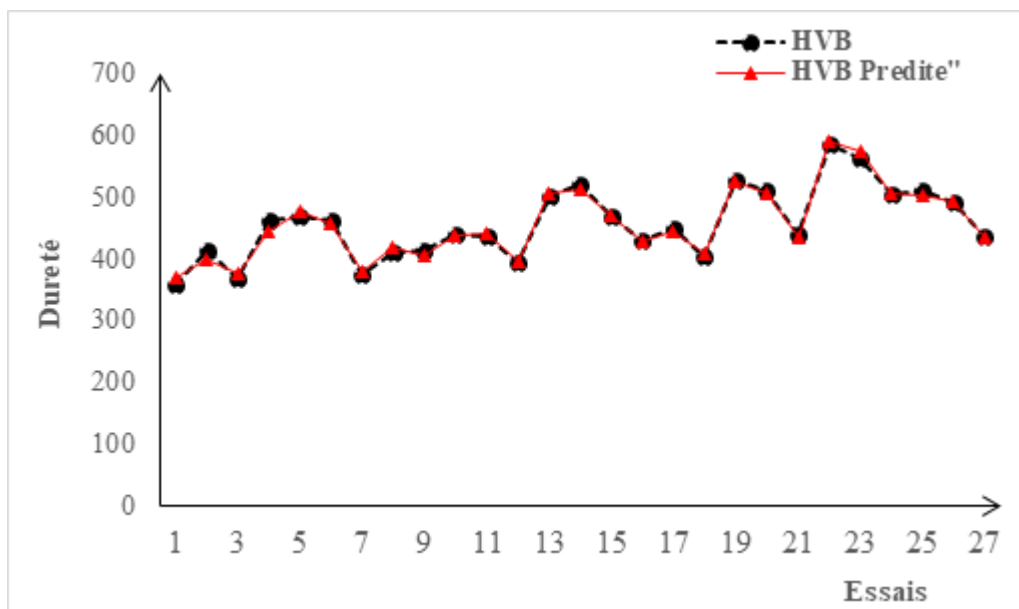


Figure III.13. Courbes des valeurs expérimentales et estimées de la dureté.

Le tableau III.2 présente les résultats détaillés de l'analyse de la variance (ANOVA) réalisée sur la dureté Hv. Cette analyse a pour principal objectif d'évaluer l'influence des facteurs principaux et de quantifier leurs contributions, ainsi que celles des interactions associées, sur la dureté Hv.

Tableau III.2 Analyse de la variance (ANOVA) du modèle pour la dureté HV.

Source	Ddl	SCE	SCA	CM	F	Prob.	Remarque
Regression	9	86161,5	86161,5	9573,5	117,115	<0,0001	-
i	1	39021,9	1707,8	1707,8	20,891	0,0003	Signifiant
f	1	473,6	25610,6	25610,6	313,300	<0,0001	Signifiant
P_y	1	4780,5	4008,9	4008,9	49,041	<0,0001	Signifiant
i*f	1	661,3	661,3	661,3	8,089	0,0112	Signifiant
i*P_y	1	7144,3	7144,3	7144,3	87,398	<0,0001	Signifiant
f*P_y	1	342,5	342,5	342,5	4,190	0,0564	Insignifiant
i²	1	770,4	770,4	770,4	9,425	0,0069	Signifiant
f²	1	29080,8	29080,8	29080,8	355,753	<0,0001	Signifiant
P_y²	1	3886,2	3886,2	3886,2	47,541	<0,0001	Signifiant
Erreur résiduelle	17	1389,7	1389,7	81,7		-	-
Total	26	87551,2				-	-

III.5.2. Paramètres du SDB et Interactions sur Hv

La Figure III.14 illustre la variation de la dureté en fonction des paramètres du brunissage et leurs interactions telle que prédite par le modèle de l'Equation III.13. Pour toutes les combinaisons entre les paramètres investigués dans la table de Taguchi, le brunissage s'est montré avec un effet bénéfique qui se traduit par l'augmentation de la dureté du matériau traité. Cet effet résulte du fait que la DPS générée par le procédé crée de nouvelles cellules de dislocations et rend difficile leur mobilité. Ainsi les couches superficielles subissent un phénomène d'écrouissage qui les consolide davantage. La meilleure dureté a été obtenue pour les valeurs les plus grandes valeurs du nombre de passe avec l'effort de 10 kgf en combinaison avec la valeur de f de 0.054 mm/tr (Voir figure III.14a).

A une force donnée, la HV croit avec le nombre de passes (i). Le niveau moyen de l'avance (f) favorise la plus grande HV. La meilleure surface de réponse est requise pour une force P_y de 10 kgf (Voir figure III.14b). Pour une telle force, la combinaison des plus grandes valeurs de l'avance et du nombre de passe donne la meilleure dureté. En combinant la dureté (P_y) à l'avance (f), on remarque que le niveau haut du nombre de passes (i=3) donne la meilleure surface de réponse dont La meilleure micro-durée a été obtenue pour i =3 passes en combinaison avec f= 0.074 mm/tr et P_y = 17 kgf (Voir figure III.14c).

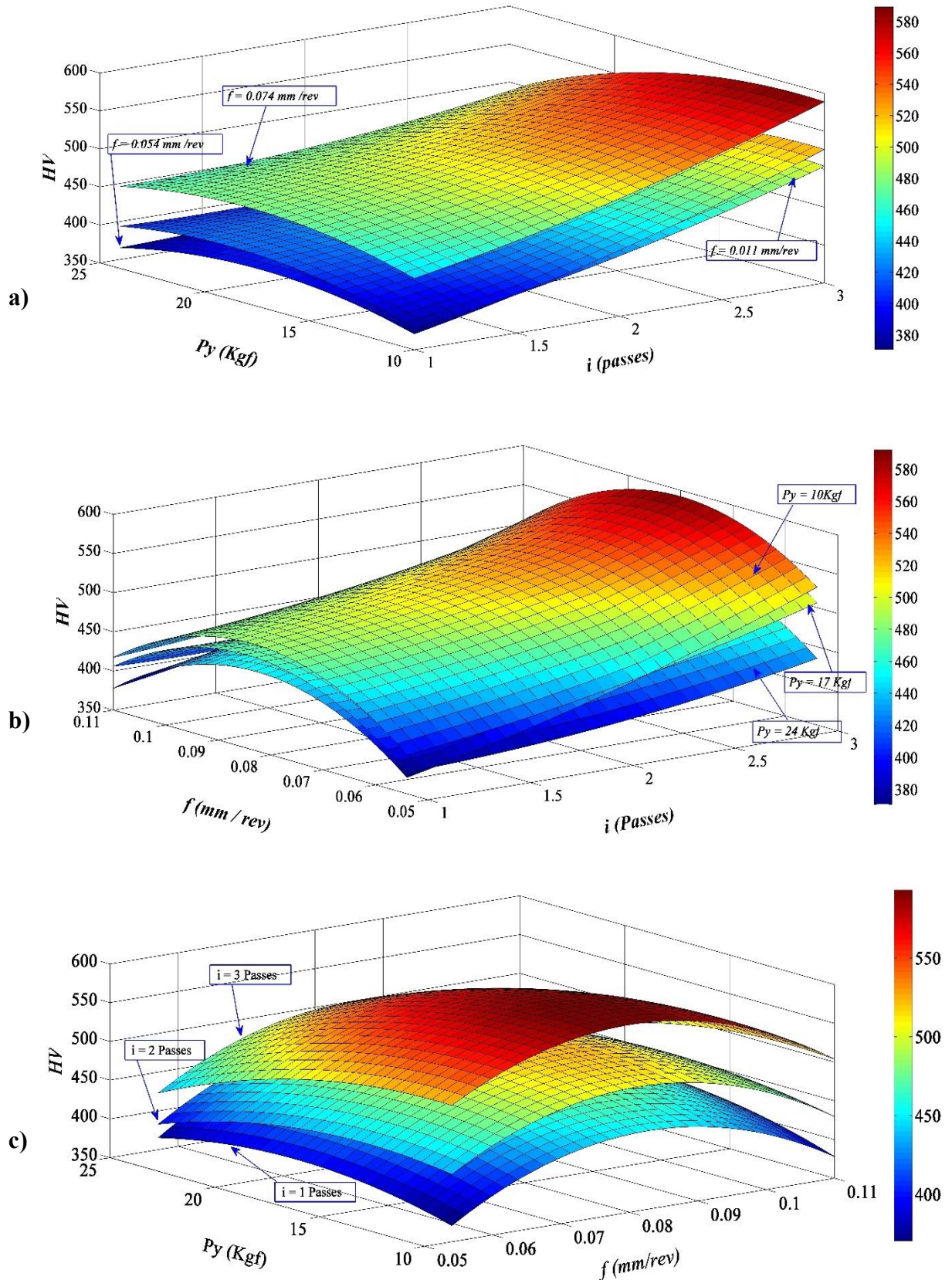


Figure III.14. Variation de la dureté e (HV_B) en fonction des paramètres de brunissage : a) P_y et i , b) f et i , c) P_y et f .

III.5.3. Analyse de la variance Multivariée de Hv

L'analyse multivariée de la dureté Hv repose sur l'exploitation des cartes multivariées, permettant d'examiner simultanément les effets principaux et les interactions entre les paramètres de brunissage. Cette approche met en évidence l'influence combinée du nombre de passes, de l'avance et de l'effort de brunissage sur l'évolution de la dureté superficielle.

Les cartes multivariées permettent d'identifier les effets croisés entre les paramètres et d'analyser la variation de la dureté en fonction de leurs différentes combinaisons. Cette représentation graphique facilite la compréhension du comportement global du système et met en évidence le régime conduisant à une amélioration maximale de la dureté.

Ainsi, l'interprétation des cartes multivariées constitue un outil pertinent pour déterminer les conditions optimales de brunissage et pour analyser l'effet des interactions sur l'intégrité de surface.

III.5.3.1. Carte Multivariée de Hv.

Les figures suivantes (III.15, III.16 et III.17) illustrent les cartes multivariées des paramètres du brunissage pour une optimisation de la dureté. Les trois cartes identifient le même régime optimal, caractérisé par une avance de 0,074 mm/tr, un nombre de passes égal à 3, et un effort de brunissage de 10 kgf.

Les Figure III.15 représente la carte multivariée à trois facteurs, mettant en évidence l'interaction entre le nombre de passes (i) et l'avance (P_y). Pour chaque valeur de f , la dureté H_{VB} varie en fonction de i et de la force de brunissage (P_y). La pente est plus marquée dans le panneau P_1 ($f=0.054$ mm/tr) entre les niveaux moyen (0) et élevé (+1) de P_y . Par ailleurs, la dureté H_{VB} maximale est observée dans le panneau P_2 ($f=0,074$ mm/tr) lorsque la force du brunissage P_y est de 10 kgf et le nombre de passe i est égal à 3. La moyenne des duretés suit une tendance similaire dans les trois panneaux, avec un écart plus important dans le panneau P_1 entre les niveaux moyen (0) et élevé (+1) de P_y . Dans le panneau P_2 , au niveau moyen (0) de l'avance ($f=0,074$ mm/tr), la moyenne des duretés atteint sa valeur maximale pour toutes les autres combinaisons de i et P_y .

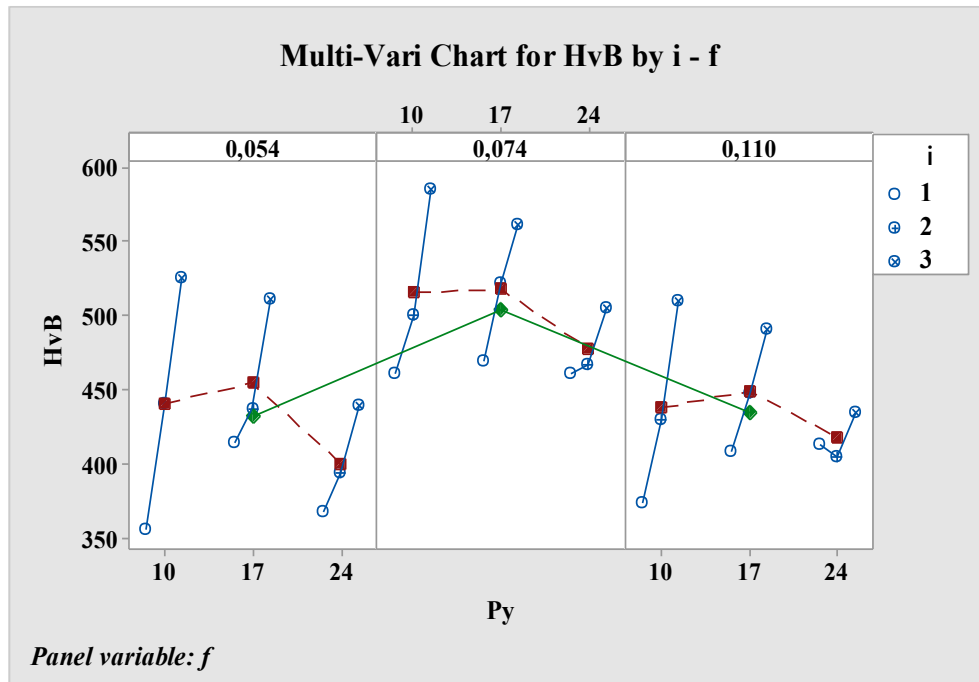


Figure III.15. Illustration graphique de l'effet de l'interaction entre i et f sur la dureté après brunissage.

La Figure III.16 présente la carte multivariée de la dureté H_{VB} en fonction de (i et f). Dans tous les panneaux de P_y , la dureté H_{VB} augmente avec l'augmentation de l'avance (f), et dans chaque section, la H_{VB} augmente avec l'augmentation du nombre de passes (i). Dans le 1^{er} panneau, la H_{VB} atteint sa valeur maximale, avec en plus une grande différence entre les niveaux moyens (0) et élevé (+1) du facteur i . La moyenne de H_{VB} à une valeur fixée de P_y évolue en fonction du niveau de f .

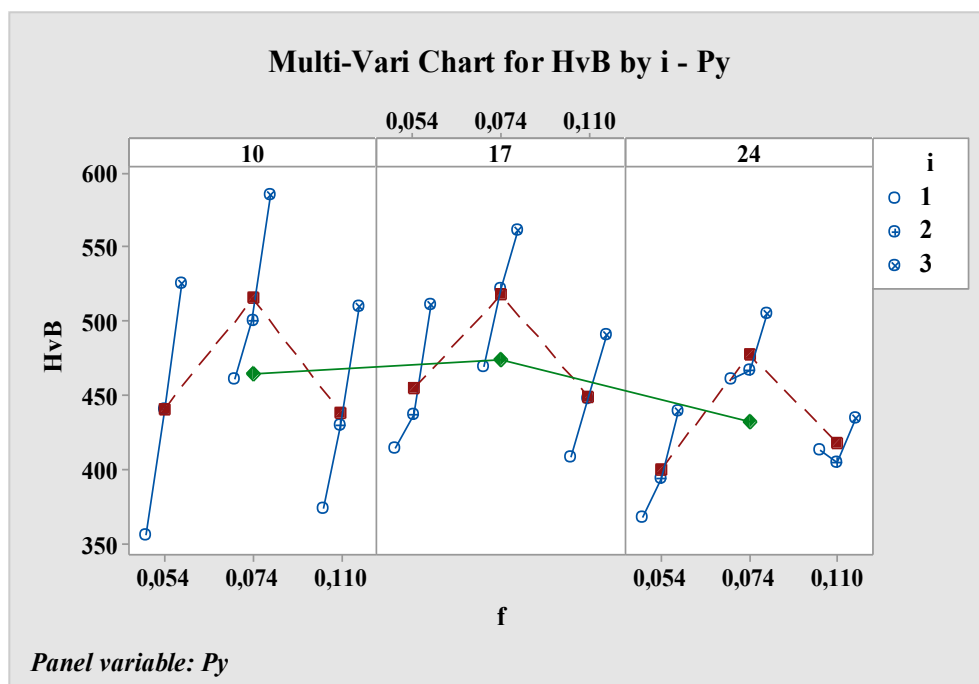


Figure III.16. Illustration graphique de l'effet de l'interaction entre i et P_y sur la dureté après brunissage.

La Figure III.17 montre la variation de la dureté (H_{VB}) en fonction de (f et P_y). Pour chaque niveau de i , la H_{VB} varie simultanément en fonction de f et P_y . La dureté maximale est observée dans la section 1 du 3^{ème} panneau, où l'avance (f) est à son niveau moyen et la force de brunissage (P_y) est au niveau bas. La dureté moyenne pour un nombre donné de passes dépend du niveau de la force de brunissage.

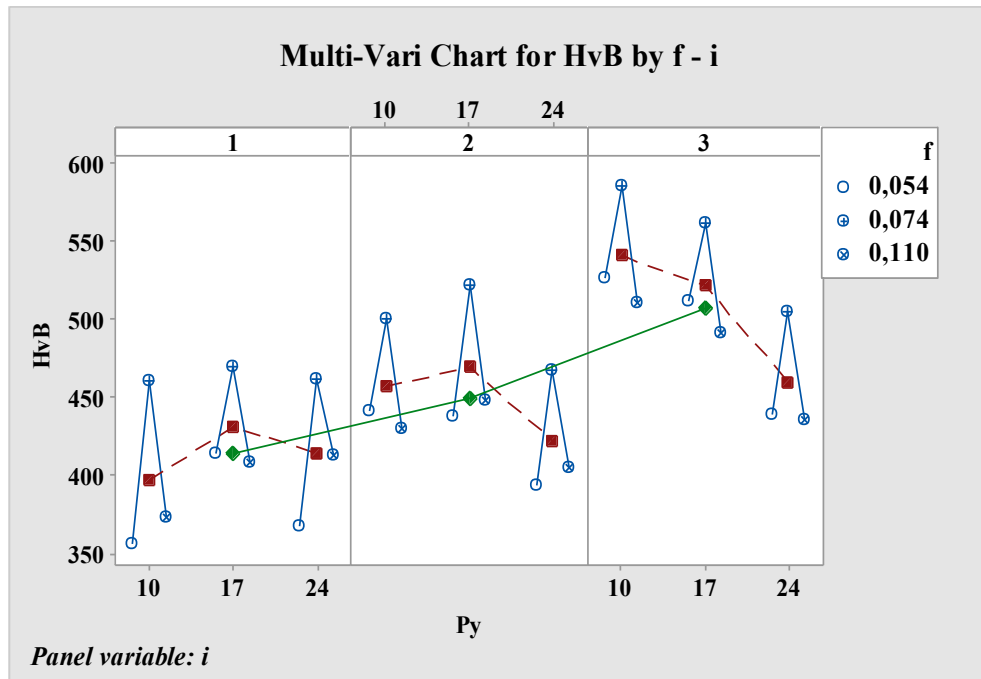


Figure III.17. Illustration graphique de l'effet de l'interaction entre f et P_y sur la dureté après brunissage.

Le plus grand écart est observé dans le cas du 3^{ème} panneau, où la valeur de la dureté Vickers (H_{VB}) connaît une chute entre les niveaux moyen et élevé de la force de brunissage (P_y). Contrairement aux deux autres conditions expérimentales (CM), pour toutes les combinaisons de valeurs entre P_y et f (facteur de la table de Taguchi), la valeur moyenne de la dureté augmente à mesure que le nombre de passes augmente. En particulier, le niveau élevé de ce facteur (i) favorise la plus grande moyenne de H_{VB} .

III.5.3.2. Contributions des Paramètres et de leurs Interactions sur Hv

La Figure III.18 illustre le taux de contribution validé par l'équation III.4 pour les différents paramètres du processus de brunissage, ainsi que leurs interactions, sur la dureté.

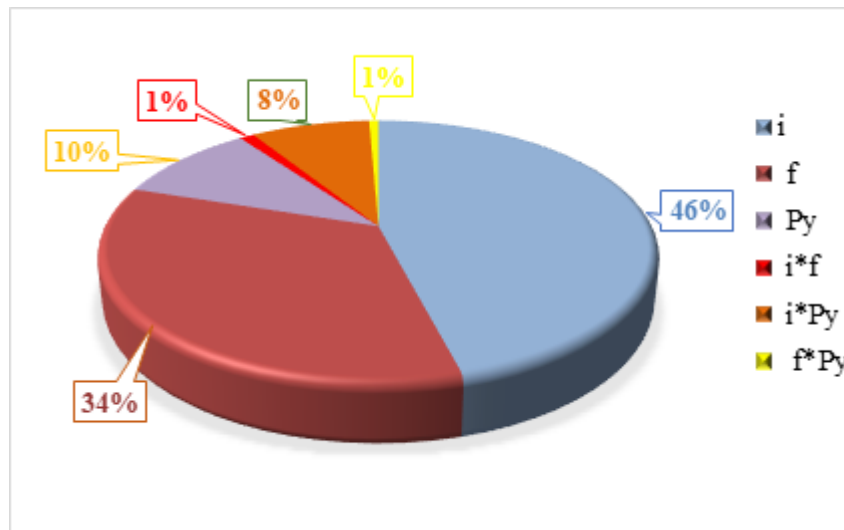


Figure III.18. Taux de contribution des paramètres du brunissage et leurs interactions sur la dureté.

Malgré leurs effets relativement modestes, les deux interactions (ixf) et (fxPy) ont chacune apporté une contribution, bien que faible, de 1 % à l'influence sur la dureté. En outre, parmi les paramètres significatifs, le nombre de passes (i) est considéré comme ayant la plus grande influence, représentant un taux de contribution de 46 %.

III.6. Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité

III.6.1. Introduction

L'Analyse de la Fonction de Désirabilité (AFD) est une méthode utilisée pour optimiser simultanément plusieurs réponses en transformant leurs attributs en une seule fonction globale, appelée Désirabilité Globale (Dg). Cette approche commence par le calcul de la désirabilité individuelle (di) pour chaque réponse, selon les formules proposées par Harrington et étendues par Derringer et Suich. Cette méthodologie se distingue par sa capacité à équilibrer différents critères de performance, dépassant les limites des analyses univariées traditionnelles.

III.6.2. Approche Multi-objective pour le Régime Optimal en Brunissage

L'indice de désirabilité évalue la performance du système en fonction des caractéristiques du paramètre de sortie. Par exemple, lorsque des valeurs plus élevées sont préférables, l'indice di mesure la capacité du système à atteindre des niveaux optimaux, fournissant ainsi une évaluation claire et efficace de la performance globale.

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \right)^r, & (III.14) \\ 0, & y_i \leq y_{min} \end{cases}$$

$$0, y_i \leq y_{min}$$

$$y_{min} \leq y_i \leq y_{max}, r \geq 0$$

$$1, y_i \geq y_{min}$$

Où :

- d_i est la désirabilité individuelle,
- y_i est la valeur attendue,
- y_{min} est la limite de tolérance inférieure,
- y_{max} est la limite de tolérance supérieure,
- r est le poids.

Lorsque le paramètre de sortie atteint la valeur minimale possible et favorable, ce qui signifie que le plus petit résultat est considéré comme le meilleur, le facteur d_i est défini par l'équation suivante (Equation III.14) :

Si y_i est en dessous d'un certain seuil, la désirabilité est évaluée à 1. Cependant, si y_i dépasse ce seuil, la désirabilité est attribuée une valeur de 0.

Lorsque la valeur de y_i est inférieure à un seuil défini, la désirabilité est établie à 1. Si y_i excède cette valeur, la désirabilité est fixée à 0. Toutefois, lorsque le paramètre de sortie présente sa performance optimale (c'est-à-dire, la valeur nominale est la plus souhaitable), l'indice d_i est défini comme suit (Equation III.15):

$$d_i = \begin{cases} 1, y_i \leq y_{min} \\ \left(\frac{y_i - y_{min}}{T - y_{min}}\right)^s, y_{min} \leq y_i \leq T, s \geq 0 \\ \left(\frac{y_i - y_{min}}{T - y_{min}}\right)^t, T \leq y_i \leq y_{max}, T \geq 0 \end{cases} \quad \text{(III. 15)}$$

Où :

- T est la valeur cible individuelle,
- s et t sont les poids.

Dans ce cas, il est impératif que la valeur y_i atteigne un objectif précis, noté T. Lorsque y_i atteint exactement T, la mesure de désirabilité est fixée à 1. Si la valeur de y_i dépasse une plage spécifiée, la mesure de désirabilité tombe à 0, représentant ainsi le scénario le moins favorable. Les coefficients r, s et t sont ajustés en fonction de la requête de l'utilisateur. Si la réponse requise doit être très proche de la cible, le coefficient peut revêtir une importance accrue. Dans un contexte différent, le coefficient pourrait accepter une valeur moindre.

L'équation ci-dessous fusionne l'ensemble des réponses en une unique mesure, qui tient compte du facteur de désirabilité individuelle de chacune d'entre elles (Equation III.16):

$$d_G = \sqrt[w]{d_1^{W1} \times d_2^{W1} \dots d_I^{W1}} \quad \text{(III. 17)}$$

Où :

- d_G est la désirabilité composite ou la désirabilité globale,

- d_i et w_i sont respectivement la désirabilité individuelle et le poids de la réponse y_i ,
- w est la somme des poids individuels.

La détermination de la combinaison idéale de paramètres de contrôle conduit à une valeur de désirabilité globale élevée, indiquant ainsi une qualité de traitement exceptionnelle.

Une fois que le modèle est validé, il devient bien évidemment possible de déterminer l'optimum pour chacune des réponses. Il suffit de dériver le modèle obtenu par rapport à chacun des paramètres et de trouver les valeurs pour lesquelles ces dérivées s'annulent. Cependant, il est important de noter que l'optimum trouvé peut parfois être une valeur limite du domaine d'étude. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'optimiser simultanément les deux réponses, à savoir R_{aB} et H_{VB} , et de trouver un compromis entre elles, plusieurs méthodes sont disponibles pour obtenir une zone de compromis.

L'approche basée sur la fonction de désirabilité est largement utilisée par les chercheurs pour l'optimisation multi-objective des réponses. Cette approche gagne en popularité en raison de sa simplicité, de sa flexibilité en matière de pondération et de sa disponibilité au sein des logiciels statistiques (comme illustré dans la Figure 14).

En donnant à la valeur recherchée (Y_{cible}) la valeur +1 et à la valeur inacceptable (Y_{in}) la valeur 0 ; la désirabilité (d_i) s'écrit comme suit : (Equation III.17).

$$d_i = \frac{y_i - y_{in}}{y_{cible} - y_{in}} \quad (IV. 17)$$

La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés. De ce fait, la désirabilité globale (composite) s'écrit sous la forme suivante (Equation III.18)

$$D_i = (d_1 * d_2 * d_3 * d_4 * ... * d_n)^{1/n} \quad (III. 18)$$

Toutes les réponses seront au plus près de leur valeur cible si la valeur est comprise entre 0 et 1, donc au meilleur compromis possible pour les réponses étudiées.

Dans cette étude on espère chercher un effet bénéfique du brunissage sur la résistance à la fatigue. Pour atteindre cet Objectif, on vise une faible rugosité ($R_{aB_{mini}}$) et une forte dureté ($HV_{B_{max}}$). Le Tableau III.3 montre les résultats de l'optimisation par SMR de la rugosité de surface (R_{aB}) et la dureté (HV_B).

Tableau III.3. Optimisation simultanée des réponses HV_B et Ra_B.

Réponse	Objectif	Régime optimale			Valeur inacceptable	Valeur ciblée	Désirabilité individuelle	Désirabilité composite
		<i>i</i>	<i>f</i>	<i>P_y</i>	<i>Y_{in}</i>	<i>Y_{cible}</i>	<i>d_i</i>	<i>D_i</i>
Ra_B	Min	3	0.074	10	0,977	0.129	1.000	0.954
Hv_B	Max	3	0.074	10	356,60	585,07	0,950	

La Figure III.19 montre l'évolution individuelle de chacune des deux réponses de sortie en fonction des paramètres du brunissage ainsi que l'effet composite du même paramètre sur les réponses simultanément. Les paramètres de brunissage optimaux obtenus s'avèrent : le nombre de passe *i*=3 passes, l'avance *f*= 0.074 mm/tr et l'effort *P_y*= 10 Kgf. La rugosité et la dureté optimisées sont Ra_B= 0.1297 μm et HV_B= 585.09.

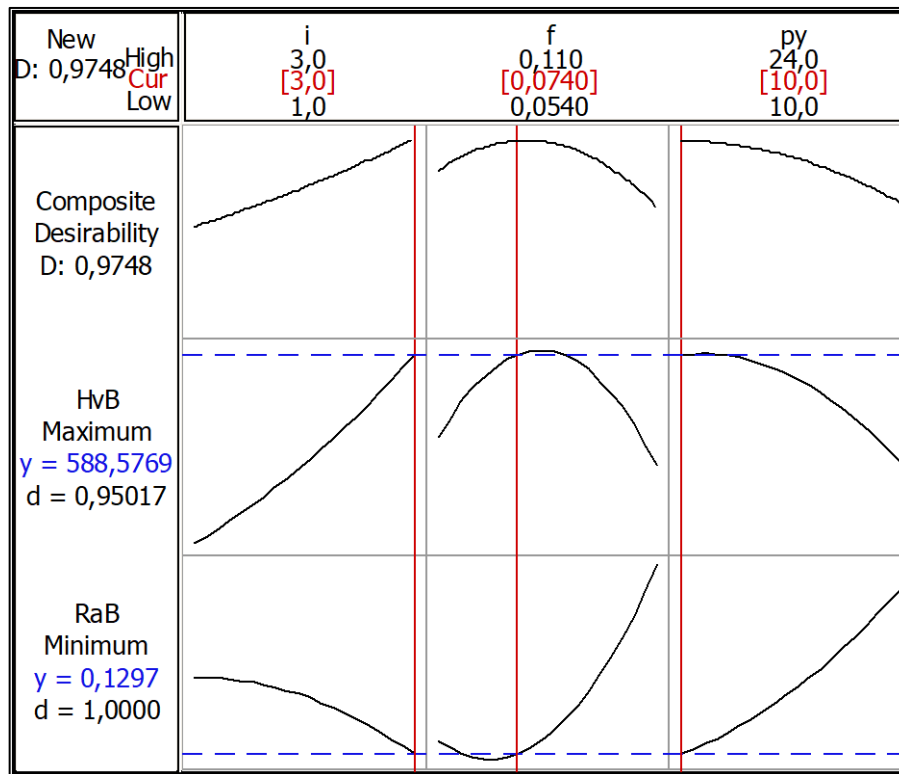


Figure III.19. Graphe d'optimisation des réponses (Ra_B et HV_B).

III.7. Conclusion

Dans cette étude, les impacts qui se sont produits à travers les paramètres utilisés lors du processus de brunissage par glissement (SB) sur la surface ont été examinés. Les expériences ont été exécutées et évaluées sur la base d'un plan factoriel complet de type Taguchi.

Sur la base de ces travaux de recherche actuels, on peut affirmer :

- La meilleure valeur de rugosité de surface (0,123 μm) a été atteinte avec une vitesse d'avance de 0,054 mm /tr, une force de brunissage de 17 kgf, un nombre de 3 passes. La

meilleure valeur de dureté de surface (585,07 HV) a été atteinte avec une vitesse d'avance de 0,074 mm/tr, une force de brunissage de 10 kgf, un nombre de 3 passes.

- Les cartes multivariées ont illustré de façon plus évidente les effets des paramètres et leurs interactions aussi bien sur Ra que sur HV. Tous les paramètres examinés ont des effets significatifs sur les réponses de sortie. L'effet de la vitesse d'avance de brunissage est le plus dominant sur la rugosité et il semble qu'il y ait une forte interaction avec le nombre de passes. Alors que le nombre de passes est le plus dominant sur la micro-dureté et il semble qu'il y ait une interaction majeure avec la force de brunissage. Pour les deux réponses ; la contribution de la force du brunissage occupe la 3^{ème} position.
- L'analyse de la fonction de désirabilité (DFA) a révélé une optimisation multi-objective pour trouver le meilleur compromis entre Ra et HV qui vise à améliorer la tenue en fatigue. Ce compromis pouvant être causée par la combinaison de ces paramètres de brunissage : $i = 3$, $f = 0,074$ mm / tr, $P_y = 10$ kgf.

Chapitre IV

Étude de la Tenue en Fatigue et des Contraintes Résiduelles induites par le SDB

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats des essais effectués précédemment sont analysés, en se concentrant spécifiquement sur le brunissage par glissement (SDB) appliqué à l'acier 100C6. Ce procédé a été testé sous des conditions contrôlées, et les paramètres clés tels que la rugosité, la nanodureté et la tenue en fatigue ont été évalués. Pour cette analyse, le régime optimal de brunissage, déterminé par l'analyse ANOVA dans le chapitre précédent, est adopté, avec un nombre de passes $i = 3$, une vitesse d'avance $f = 0,074$ mm/tr et un effort de brunissage de 10 kgf. Cette configuration, ayant montré les meilleurs résultats, vise à démontrer l'influence de ce régime sur la résistance à la fatigue et les contraintes résiduelles, offrant ainsi une compréhension approfondie des effets du SDB sur les propriétés de l'acier 100C6.

IV.2. Effet du SDB sur les contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont des contraintes présentes dans un objet en l'absence de toute force externe. Dans les industries manufacturières, une contrainte résiduelle optimale et une qualité de surface adéquate sont toujours nécessaires. Lors de l'usinage de pièces, des contraintes résiduelles de traction sont souvent générées, ce qui est une cause majeure de surcharge et de distorsion des pièces.

Comme ces contraintes peuvent entraîner des comportements inattendus, notamment une diminution de la durée de vie en fatigue des composants mécaniques [103], il est essentiel de les prédire avec précision et de les minimiser. Cela permet d'optimiser la résistance et la durabilité des surfaces usinées, améliorant ainsi l'efficacité des opérations de brunissage.

Des techniques quantitatives d'évaluation des contraintes résiduelles, telles que le perçage de trous [117], le sectionnement et la diffraction des rayons X [2], ont été employées pour analyser l'intégrité des structures. Cependant, ces méthodes conventionnelles offrent souvent des mesures qualitatives limitées. Récemment, de nombreuses études se sont penchées sur la relation entre les contraintes résiduelles et la nanodureté des matériaux, tel que la mesure des contraintes résiduelles par indentation présente alors plusieurs avantages : elle permet des résultats quantitatifs, est non destructive, et facilite les essais. Cette technique repose sur la comparaison des courbes d'indentation des états sous contrainte et sans contrainte.

La nanodureté est ensuite déterminée soit directement à partir de la mesure optique de l'empreinte, soit indirectement à partir de la profondeur de pénétration et de la géométrie de l'indenteur. Des études ont montré que le comportement charge-déplacement de l'indentation dans le régime de transition élasto-plastique entre le contact élastique à faibles charges et le contact plastique pleinement développé à charges élevées, est affecté par les contraintes résiduelles de manière potentiellement mesurable.

IV.3. Technique d'évaluation des contraintes résiduelles

Cette technique est plus souvent opérée à partir d'un contact initial entre un indenteur sphérique et un matériau élasto-plastique isotrope se produit à faible contrainte dans le régime élastique (Voir figure IV.1a). Tant que le rayon du contact a est petit par rapport au rayon de l'indenteur R , la théorie classique développée par Hertz peut être utilisée pour décrire le comportement de déformation jusqu'à la charge à partir de laquelle le fluage commence. Dans la cette étude l'indentation a été créée de façon à évaluer la nanodureté Vickers au moyen d'une pyramide à base carrée.

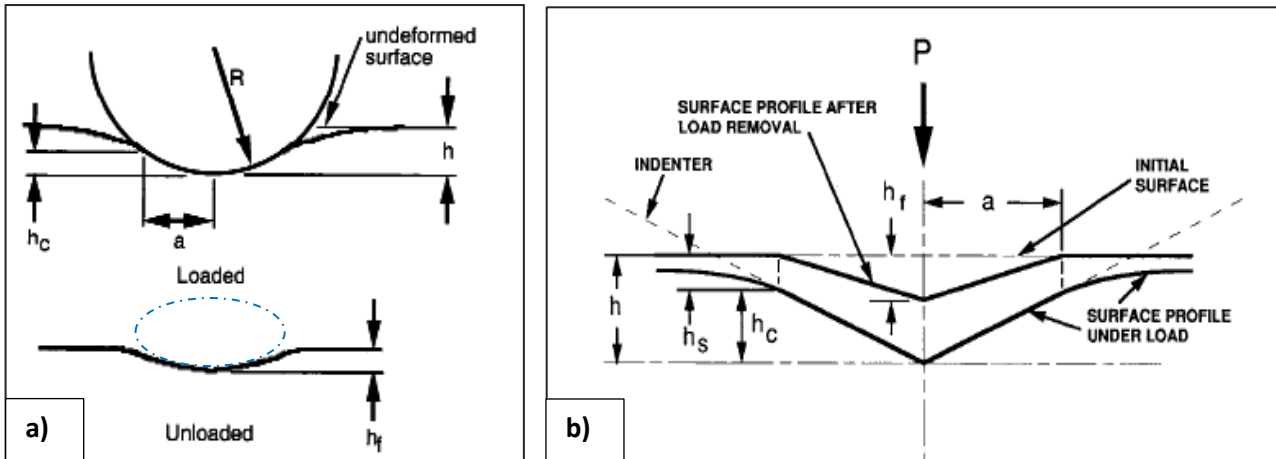


Figure IV.1. Géométrie de l'indentation a) sphérique [118] ; b) Vickers [119].

La figure IV.1b illustre le principe de l'indentation Vickers et montre une coupe transversale de l'indentation, identifiant les paramètres utilisés dans l'analyse. À tout moment pendant le chargement, le déplacement total h s'exprime comme $h=h_c+h_s$, où h_c est la distance verticale correspondant à la zone de contact (appelée profondeur de contact) et h_s est le déplacement de la surface au périmètre du contact.

À la charge maximale, les valeurs de charge et de déplacement sont notées F_{max} et h_{max} , respectivement, et le rayon du cercle de contact est a . Lors du déchargement, les déplacements élastiques sont récupérés, et lorsque l'indenteur est complètement retiré, la profondeur finale de l'empreinte de nanodureté résiduelle est notée h_f .

L'équation reliant la profondeur totale de pénétration (h) au rayon de contact (a) pour un contact hertzien est (Equation. IV.1) :

$$h = \frac{a^2}{R} \quad (IV.1)$$

Où h est la profondeur totale de l'empreinte

À l'état non contraint, les contraintes résiduelles sont liées aux caractéristiques et aux propriétés géométriques de l'empreinte indentée par la relation (Eq. IV.2).

$$\frac{\sigma^R}{\sigma_y} = 1 - \frac{3.72}{3\pi} \left(\frac{E_e a}{R\sigma_y} \right) \quad (IV. 2)$$

Où : σ^R est la contrainte résiduelle

σ_y est la limite élastique

a est le rayon de contact

R est le rayon de l'indenteur

E_e (= 189,63 MPa) : est le module de Young effectif.

Tant que le rayon du contact (a) est petit par rapport au rayon de l'indenteur R , la théorie classique développée par Hertz peut être utilisée pour décrire le comportement de déformation jusqu'à la charge où le fluage commence. Le rayon de contact (a) peut être calculé à partir de la profondeur totale de pénétration (h) selon la géométrie de contact (Equation. IV.1). Dans le cadre de cette étude on suppose que l'indenteur est de forme prismatique à base carrée au sommet arrondi de rayon R (Voir figure.IV.2). Sous l'effet de la charge maximale (F_{max}) appliquée par l'indenteur, il se crée dans le matériau, une pression de contact (P_m) tel que (Equation IV.3).

$$p_m = \frac{F_{max}}{A_c} = \frac{F_{max}}{\pi a^2}, \quad (IV. 3)$$

Dans cette analyse, la pression de contact P_m sera calculée afin de déterminer le rayon de contact a . Selon J.G. Sawadener, [118] une valeur positive de la pression indique que celle-ci est de nature compressive.

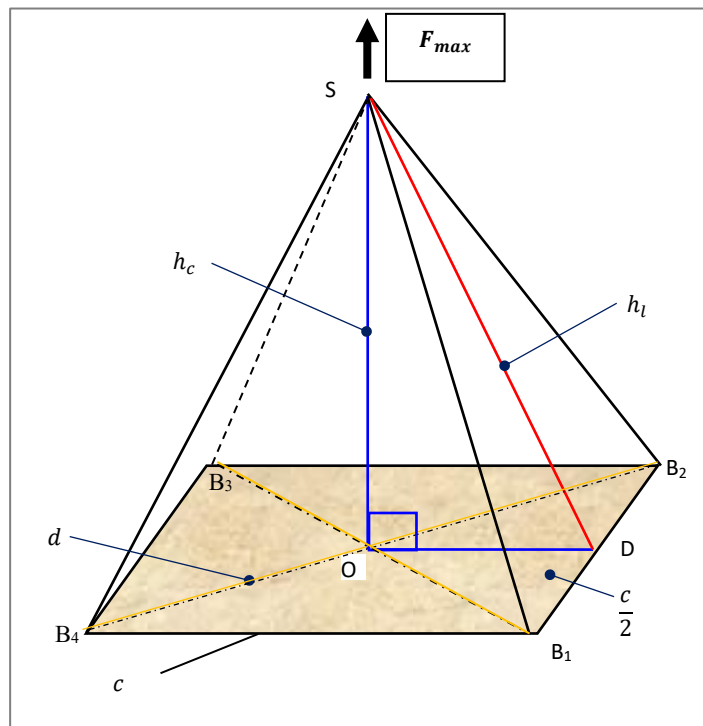


Figure IV.2. Représentation schématique des hauteurs h_c , h_l et c

Par ailleurs, le rayon de contact (a), peut être évalué à partir des dimensions de l'empreinte. Pour une pyramide, à base carré de côté (c), la diagonale (d) de l'empreinte (Voir figure.IV.2) peut être calculée à partir du triangle ($B_4B_2B_1$) qui donne (Equation IV.4):

$$d = \sqrt{2} \cdot c \quad (IV.4)$$

Ainsi, le côté c peut être calculé à partir de la diagonale d (Equation IV.5):

$$c = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (IV.5)$$

La surface réelle de contact A est déterminée les aires des 4 triangles qui couvrent la pyramide. Ainsi l'aire du triangle SB_1B_2 vaut (Equation IV.2):

$$A_{SB_1B_2} = A = \left[\frac{c \times h_l}{2} \right] \times 4 = (c \times h_l) \times 2 \quad (IV.6)$$

Du triangle SOD on tire :

$$h_l = \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 + (h_c)^2} \quad (IV.7)$$

La différence entre les profondeurs maximale et finale ($h_{max} - h_f$) est obtenue à partir de la courbe de déchargement de l'indentation (Voir figure IV.3).

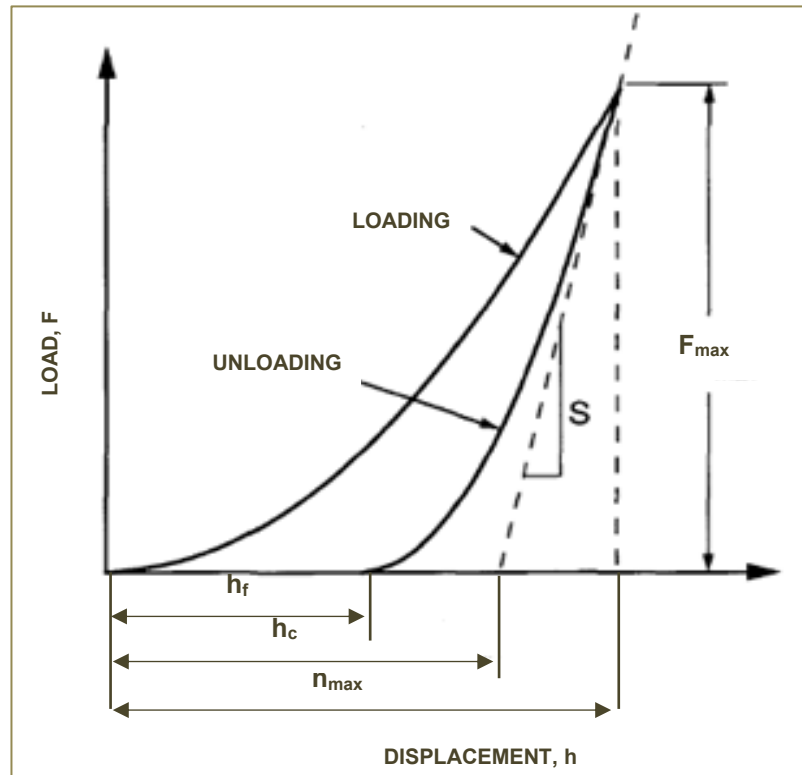


Figure IV.3. Représentation schématique des données de charge par rapport au déplacement de l'indenteur pour une expérience d'indentation.

La hauteur de contact (h_c) de la pyramide enfoncée dans le matériau, peut être déduite graphiquement à partir de la courbe de charge-décharge obtenue lors de l'essai d'indentation Vickers. Cette grandeur est donnée par l'intersection de la pente initiale de la courbe de déchargement avec l'axe des déplacements [119].

En remplaçant h_i par sa valeur, La surface de contact réelle est alors donnée par (Equation. IV.8):

$$A = (c \times h_i) \times 2 \quad (IV. 6)$$

$$A = \left(c \cdot \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 + (h_c)^2} \right) \times 2 \quad (IV. 8)$$

Finalement l'Equation IV.2 donne :

$$a = \sqrt{h R} \quad (IV. 2)$$

En utilisant l'Equation IV.3, nous pouvons réécrire la pression de contact p_m comme suit (Equation IV.9):

$$p_m = \frac{F_{max}}{\left(c \times \sqrt{\left(\frac{c}{2}\right)^2 + (h_c)^2} \right) \times 2} \quad (IV. 9)$$

Le module de Young effectif peut être calculé à partir de l'Equation IV.10):

$$E_e = \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right) \quad (IV. 10)$$

Où : E_i et ν_i sont respectivement le module d'élasticité et le coefficient de Poisson de l'indenteur, et E_s et ν_s sont les mêmes quantités pour le matériau.

Après avoir détaillé les différentes étapes d'analyse, de calculs et de modélisation, les résultats finaux obtenus sont regroupés et présentés dans le tableau ci-dessous. Ces résultats incluent les dimensions géométriques de l'empreinte, telles que le côté (c), la hauteur (h_i), la surface réelle de contact (A), ainsi que les paramètres mécaniques comme la pression de contact (P), le rayon de contact (a), le rayon de l'indenteur (R) et les contraintes résiduelles (σ_R). Ces valeurs permettent de caractériser le comportement du matériau sous l'effet de l'indentation et d'évaluer l'influence des traitements appliqués (Voir tableau IV.1).

Tableau IV.1 Résultats des essais d'indentation

	Usinage	SDB	Usinage	SDB	Usinage	SDB
F (N)	0,5	0,5	1	1	1,5	1,5
d (µm)	16,5	13	27	19	32	27,3
h _{max} (µm)	2,7	1,53	4,5	2,5	5	3,5
h _c (µm)	1,74	1,4	3,85	2,4	3,75	3
HV	360	575	326	490	287	372
c (µm)	11,67	9,19	19,09	13,43	22,63	19,30
h _l (µm)	6,087	4,805	10,293	7,133	11,919	10,107
A (µm ²)	142,051	393,028	88,333	191,674	539,392	390,230
P (MPa)	3519,86	5660,39	2544,34	5217,18	2780,91	3843,89
a (mm)	0,0067	0,0053	0,01112	0,0078	0,0131	0,0111
R (mm)	0,01675	0,01838	0,02781	0,02442	0,03436	0,03550
σ _R (MPa)	418	436	418	432	410	433

Cette méthodologie permet une évaluation détaillée des caractéristiques de contact et des contraintes résiduelles, essentielles pour une compréhension approfondie du comportement du matériau. Les essais d'indentation ont été effectués à une vitesse de chargement de 0,3 mm/min et avec une charge d'indentation maximale de 50 à 150gf dans un état sans contrainte.

Les indentations sont effectuées avec mesure continue de la charge et de la profondeur. Pour s'assurer que l'empreinte d'indentation affecte la couche superficielle traitée, les essais ont été conduits à différentes charges dans deux états de traitement (de tournage et brunissage avec les paramètres suivant : N=560 tr/min, f=0.074 mm/tr, i=3 passes, r=2.5 mm. Les paramètres d'indentation sont obtenus à partir de trois essais d'indentation moyennant trois charges maximales appliquées par l'indenteur en l'occurrence 0,5, 1,00 et 1,50 N pour chacun des états de mise en œuvre. Enfin, le matériau d'essai (100C6) est supposé capable de supporter une indentation modérée sans fracture.

L'indentation provoque une déflexion élastique et une déformation plastique telles que des amas ou des enfoncements autour de l'empreinte, de sorte que la profondeur de contact réelle devrait refléter la déflexion élastique, les amas et les enfoncements à la profondeur maximale.

IV.4. Résultats et discussions

IV.4.1. Courbes d'indentation

Les dépendances de la courbe d'indentation et des paramètres d'indentation vis-à-vis des états de contrainte sont présentées dans la figure IV.4. Les analyses des données de charge-déplacement d'indentation et les courbes qui en résultent montrent que dans les deux cas de traitement, le comportement local du matériau en fonction de la charge et de la profondeur de contact est typiquement élasto-plastique.

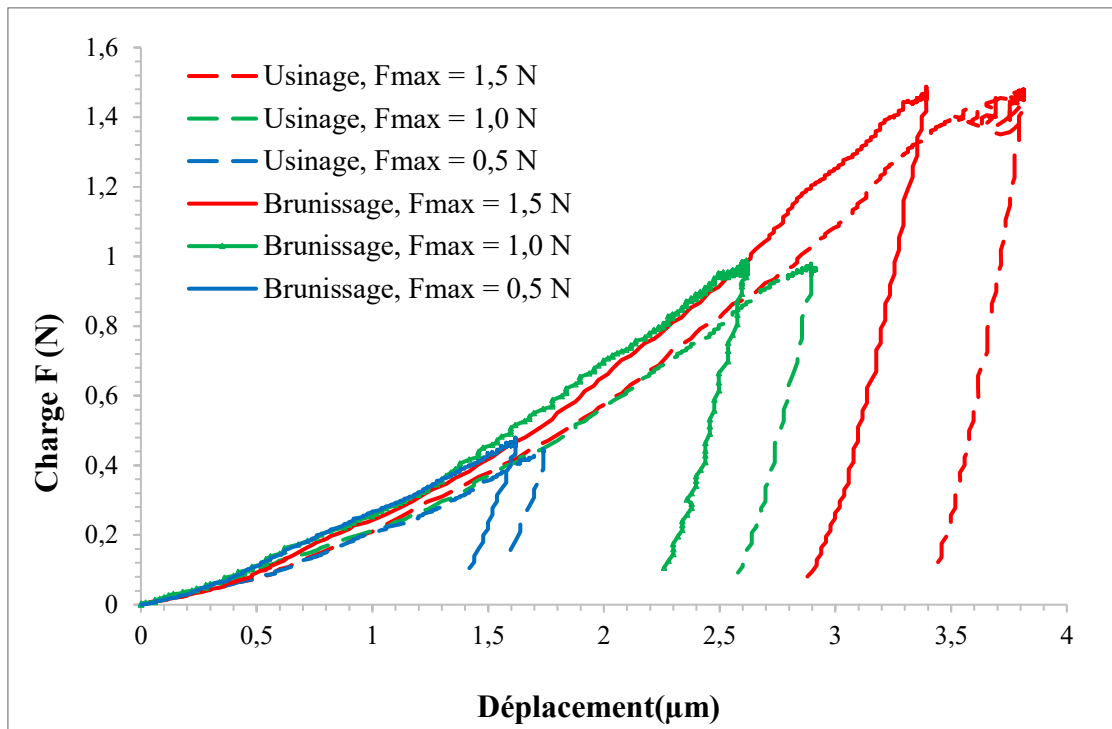


Figure IV.4. Courbes d'indentation de l'acier 100C6.

Tout au long de l'essai, les courbes charge-décharge illustrent un comportement ductile type. Lors du chargement du matériau, les couches superficielles, subissent des déplacements pouvant être irréversibles au-delà d'un certain niveau de charge. Une fois la charge maximale atteinte (F_{max}), la décharge se produit suite aux relaxations des contraintes et le matériau après s'être pénétré d'une profondeur maximale de pénétration de (h_{max}) tente de revenir à son état initial.

Compte tenu du comportement ductile et de l'écoulement dans la zone de transition, les courbes enregistrent une boucle ouverte. Le retrait de la couche superficielle a lieu jusqu'à une valeur finale (h_f). Cependant la décharge est purement élastique, ainsi le déplacement élastique peut être récupéré pour ne garder en fin d'essai que la profondeur résiduelle de l'empreinte (h_f) qui caractérise le déplacement irréversible des couches superficielles.

Quel que soit la charge maximale (F_{max}) appliquée par l'indenteur, on peut constater dans les deux cas de mise en œuvre que les courbes charge-déplacement évoluent avec la même tendance tant à la charge qu'à la décharge. Toutefois, les échantillons ayant subi un traitement de brunissage ont fait apparaître des courbes décalées vers la droite ce qui se traduit par une réduction des paramètres géométriques de l'empreinte indentée. Ceci traduit une grande résistance à la pénétration du matériau bruni comparée à celle du matériau usiné.

IV.4.2. Influence de F_{max} sur la profondeur de pénétration

La figure IV.5 illustre l'influence de la charge maximale (F_{max}) sur la hauteur de contact (h_{max}) pour les deux traitements appliqués à l'acier 100C6.

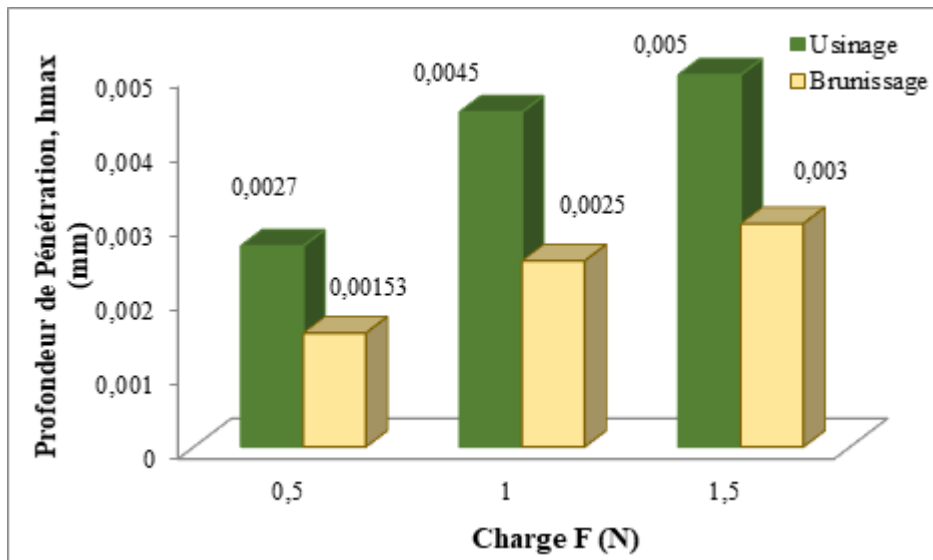


Figure IV.5. Influence de la charge sur la profondeur de pénétration

Pour les trois niveaux de chargement examinés, il est observé que la hauteur de contact générée dans le matériau suite à l'opération de brunissage est significativement inférieure à celle mesurée après le processus d'usinage. Sous les charges F_{max} de 0,5 N et 1 N, la réduction observée est comparable, atteignant environ 44%.

Lorsque la charge est augmentée à 1 N, la différence de hauteur de contact est réduite à environ 40%. Cela laisse supposer qu'en raison de cette charge, l'indenteur pénètre au-delà des sous-couches traitées du matériau, où l'effet bénéfique du brunissage diminue à mesure que l'on se rapproche du cœur du matériau. Cette observation corrobore l'hypothèse selon laquelle les contraintes résiduelles atteignent généralement leurs niveaux maximaux dans les couches superficielles du matériau avant de se stabiliser à des profondeurs plus importantes.

IV.4.3. Influence du brunissage sur la nanodureté

La nanodureté Vickers présente une relation inversement proportionnelle avec la charge maximale d'indentation. Les analyses effectuées révèlent une amélioration substantielle de la nanodureté des échantillons après le SDB. L'effet optimal de ce procédé s'observe sous une charge d'indentation de 0,5 N, où l'augmentation de la nanodureté atteint approximativement 60 % (Voir figure IV.6). Ce constat suggère que, sous cette charge, l'empreinte d'indentation se situe dans une couche superficielle fortement influencée par le procédé de traitement mécanique.

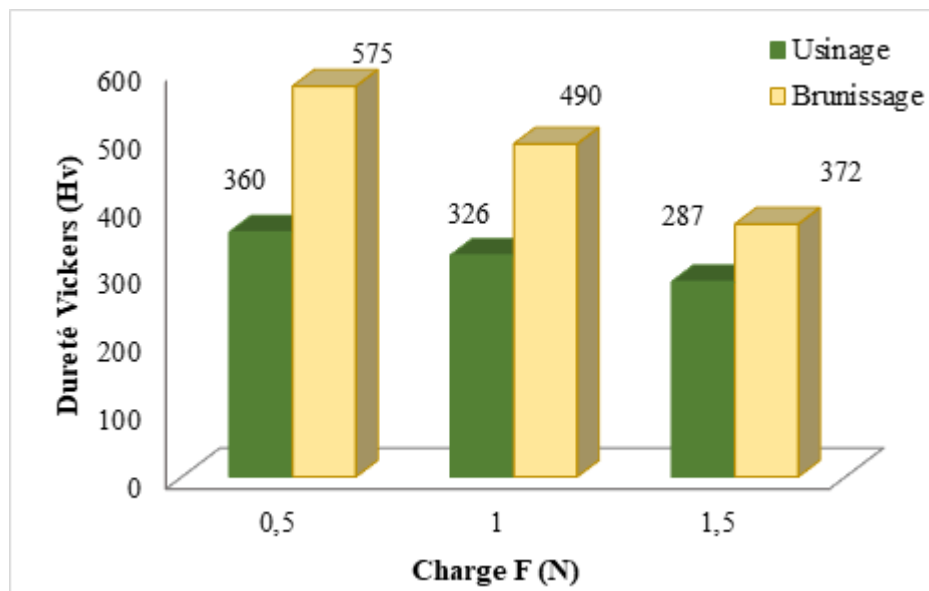


Figure IV.6. Influence de la charge sur la nanodureté.

En revanche, une diminution de l'effet est notée avec l'augmentation de la charge d'indentation, ce qui entraîne une approche progressive vers le cœur du matériau.

Les données recueillies indiquent clairement que le brunissage s'avère efficace pour rehausser la nanodureté, en particulier lorsque la nanodureté initiale du matériau est faible. Cette méthode exerce une influence significative sur les propriétés mécaniques, permettant un renforcement appréciable de la nanodureté du matériau.

IV.4.4. Influence du brunissage sur les contraintes résiduelles

Les résultats obtenus pour les contraintes résiduelles avant et après le processus de brunissage montrent une tendance claire indiquant une augmentation des contraintes résiduelles post-traitement, quel que soit le niveau de charge appliqué. Avant brunissage, les contraintes résiduelles mesurées sont respectivement de (418, 419, et 410) MPa pour des charges de 0.5 N, 1 N, et 1.5 N respectivement. Après l'application du brunissage, ces valeurs augmentent à (436, 432, et 433) MPa pour les mêmes charges (Voir figure IV.7).

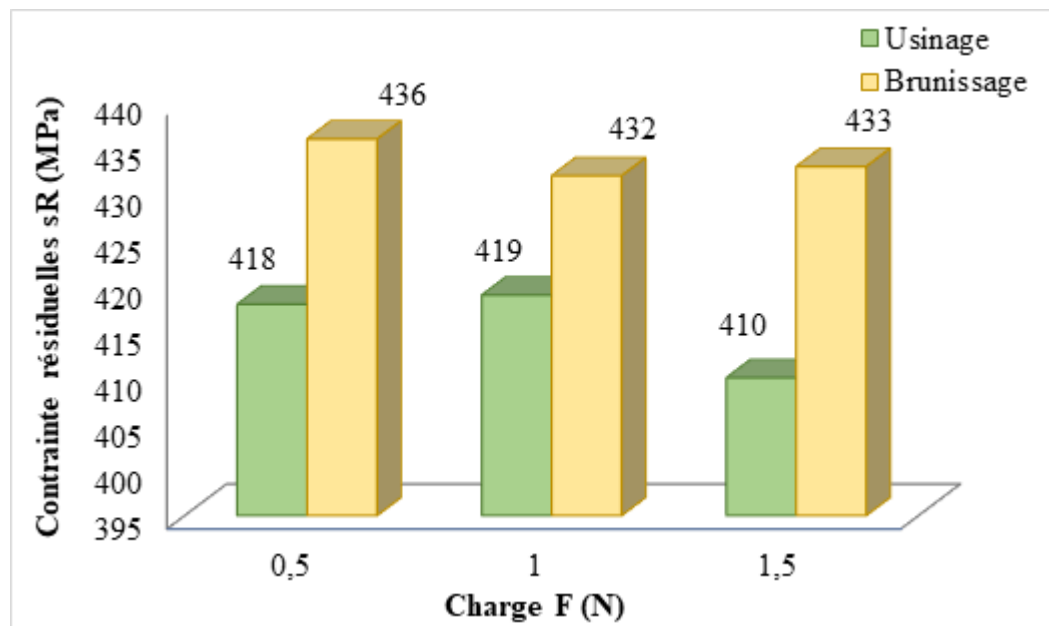


Figure IV.7. Effet du brunissage sur les contraintes résiduelles.

L'augmentation des contraintes résiduelles après brunissage est significative : 18 unités pour une charge de 0,5 N, soit une hausse de 4,31 % ; 13 unités pour 1 N, représentant une augmentation de 3,10 % ; et 23 unités pour 1,5 N, correspondant à une augmentation de 5,61 %. Ces résultats sont confirmés par l'histogramme, qui montre que les valeurs des contraintes résiduelles sont systématiquement plus élevées après le brunissage. L'analyse des données suggère que le brunissage améliore les contraintes résiduelles du matériau, cette amélioration étant plus prononcée sous des charges plus élevées.

Cette tendance pourrait indiquer que le brunissage est particulièrement efficace pour augmenter les contraintes résiduelles sous des charges plus importantes, probablement en raison de modifications structurales ou superficielles accrues du matériau. En résumé, le brunissage modifie non seulement les propriétés résiduelles des matériaux, mais son impact est également influencé par le niveau de charge appliqué, avec des effets plus marqués à des charges plus élevées. Après avoir étudié l'influence du brunissage sur la rugosité, la nanodureté et les contraintes, l'analyse se poursuit par l'évaluation de son impact sur la tenue en fatigue du matériau.

IV.5. Influence du brunissage sur la tenue en fatigue

IV.5.1. Introduction

Il est apparu qu'un mauvais état aussi bien physique que géométrique des couches superficielles peut être responsable d'environ 85% des ruptures des éléments de structure parmi lesquelles le phénomène de fatigue constitue à lui seul 80% de ces ruptures. Ainsi, dans plusieurs domaines de l'industrie mécanique, les meilleurs résultats pour les pièces à risque

d'endommagement par fatigue sont obtenus en effectuant un traitement (TMS) qui offre un bel état de surface en termes de nanodureté et de rugosité entre autres, pour améliorer la résistance à la fatigue et la durée de vie des éléments de structure.

IV.5.2. Effet du SDB sur la durée de vie

Il importe donc de sélectionner les paramètres appropriés du processus de brunissage pour mieux gérer l'influence de ce procédé sur le comportement en fatigue du composant à risque. La figure IV.8 illustre l'effet du brunissage sur la durée de vie en fatigue de l'acier 100C6. Le brunissage était réalisé avec les paramètres optimaux à partir de la fonction de désirabilité (§III.6).

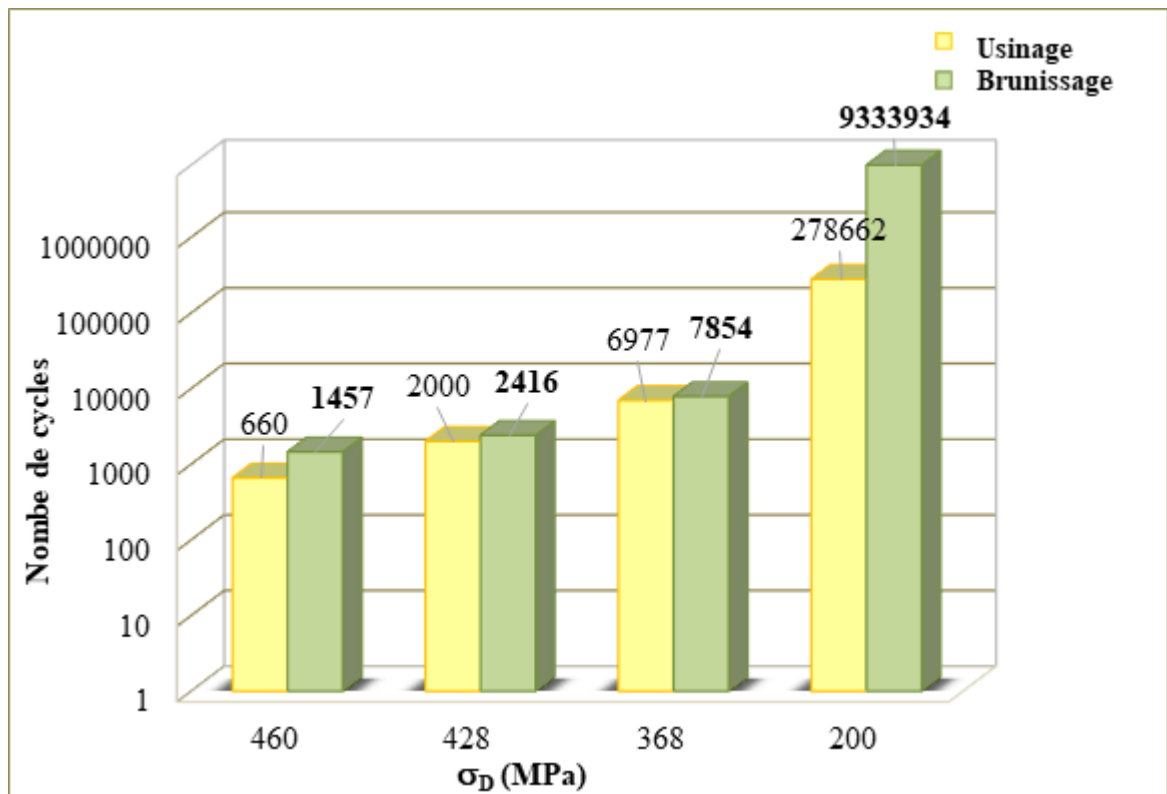


Figure IV.8. Effet du traitement sur la durée de vie en fatigue a) tournage, b) brunissage.

L'évolution du nombre de cycles à rupture en fonction du chargement (σ_{max}) suit la même tendance d'une courbe de Wöhler pour les deux types de mise en œuvre. Quel que soit le domaine de chargement, le brunissage s'est montré d'un effet bénéfique à la durée de vie en fatigue. En considérant $\sigma_D = 0.4 R_m$, On constate que le meilleur effet du brunissage est observé dans le *domaine d'endurance* ($\sigma_{max}=200$ MPa) où le gain en durée de vie a atteint 9055272 cycles à rupture.

Pour rendre plus évident l'effet du brunissage, la figure IV.9 montre l'évolution du taux d'amélioration de la durée de vie en fonction du rapport sans dimension ((σ_{max} / R_m)).

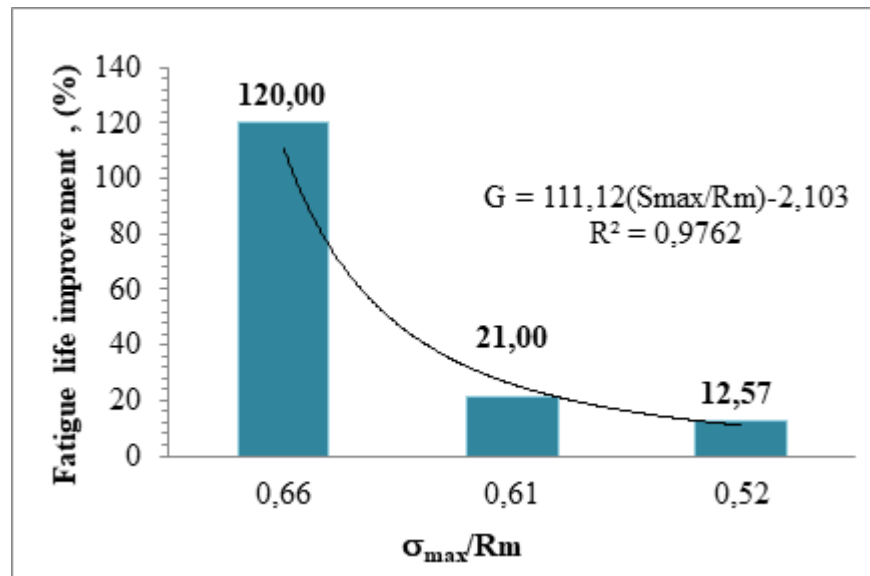


Figure IV.9. Rapport d'Amélioration de la Durée de Vie en Fatigue en Fonction de σ_{\max}/R_m

Sous une sollicitation en fatigue à $\sigma_{\max} = 368$ MPa (soit 52% de R_m), l'effet du brunissage se traduit par une augmentation de la durée de vie d'environ 12.57%. Ce taux représente le plus faible gain apporté par le brunissage. En effet sous une telle contrainte le matériau est statiquement à l'état élastique. L'éprouvette travaille dans le domaine d'endurance à grand nombre de cycles de fatigue et n'aurait subi aucun écrouissage préalable au brunissage.

En augmentant le chargement en fatigue à $\sigma_{\max} = 428$ MPa (soit 61% de R_m), le matériau entre statiquement dans une phase intermédiaire qui marque la transition élastique-plastique. En effet dans ce domaine plusieurs perturbations structurales se manifestent et les dislocations sont perturbées dans leurs mouvements. Le brunissage semble commencer à écrouir le matériau et donner un peu plus de son effet. Ainsi la durée de vie de l'éprouvette brunie est améliorée de 21%.

Lors d'un chargement à $\sigma_{\max} = 460$ MPa qui équivaut 66% de R_m , le matériau est sollicité en fatigue oligocyclique où il travaille dans le domaine de fatigue à endurance limitée. A ce niveau de chargement le matériau se plastifie et s'écrouit en volume. Cet écrouissage cyclique du matériau qui renforce celui des couches superficielles généré par le brunissage ne peut pas compenser le chargement imposé c'est pourquoi la durée de vie est nettement réduite. Toutefois la durée de vie de l'éprouvette brunie a augmenté de 120% par rapport à celle de l'éprouvette usinée.

IV.6. Analyse fractographique

Les surfaces rompues ont été examinées par inspection visuelle avec suivi optique et analysées en détail au moyen d'un microscope électronique à balayage (MEB) de type

QUANTA FEG250. Les figures IV.10 jusqu'à IV.13 présentent les macrographies optiques et les images MEB des faciès de rupture des éprouvettes usinées et brunies, testées en fatigue en flexion rotative.

Quel que soit le traitement appliqué (tournage ou brunissage), les observations en microscopie optique montrent que les surfaces rompues se caractérisent par deux zones distinctes : une zone de rupture par fatigue (A_F), présentant une surface lisse et brillante, due au glissement des lèvres des fissures l'une par rapport à l'autre, et une zone de rupture finale (A_{RF}), dont la surface est mate en raison de l'arrachement final de la matière.

Indépendamment de la valeur de σ_{max} appliqués, il semble que l'amorçage des fissures se produise en surface, suivi d'une propagation vers le cœur de la matière jusqu'à la rupture finale, caractéristique d'une rupture en fatigue par flexion rotative (F_R). Cependant, pour certains niveaux de chargement, le brunissage a suffisamment écroui les couches superficielles pour que l'amorçage des fissures se fasse dans les sous-couches du matériau.

Dans le domaine plastique ($\sigma_{max} = 460$ MPa), les fronts de rupture finaux se situent au centre de la section droite de l'éprouvette, ce qui témoigne d'un niveau de sollicitation élevé (Voir figure IV.10). À ($\sigma_{max} = 428$ MPa, correspondant à une réduction du chargement en fatigue, la rupture finale se produit en dehors de la zone centrale de la section de l'éprouvette (Voir figure IV.11). Lorsque le chargement diminue davantage, à ($\sigma_{max} = 368$ MPa ou moins (dans les domaines de transition et élastique), l'examen optique montre une rupture finale en surface (Voir figure IV.12), en raison de sollicitations plus faibles en F_R .

L'examen en microscopie électronique à balayage (MEB) de la zone de rupture finale (A_{RF}) montre :

Dans le domaine plastique à $\sigma_{max} = 460$ MPa, la zone A_{RF} présente des stries marquées par des cupules, témoignant de l'importance des déformations plastiques. La micrographie MEB (Voir Figure IV.10) révèle également des clivages accompagnés de réamorçages sous forme de rivières, phénomène plus accentué dans le cas du brunissage. Dans la zone de fatigue (A_F), les cupules apparaissent nettement plus allongées en brunissage qu'en tournage (Voir figure IV.10 a et IV.b).

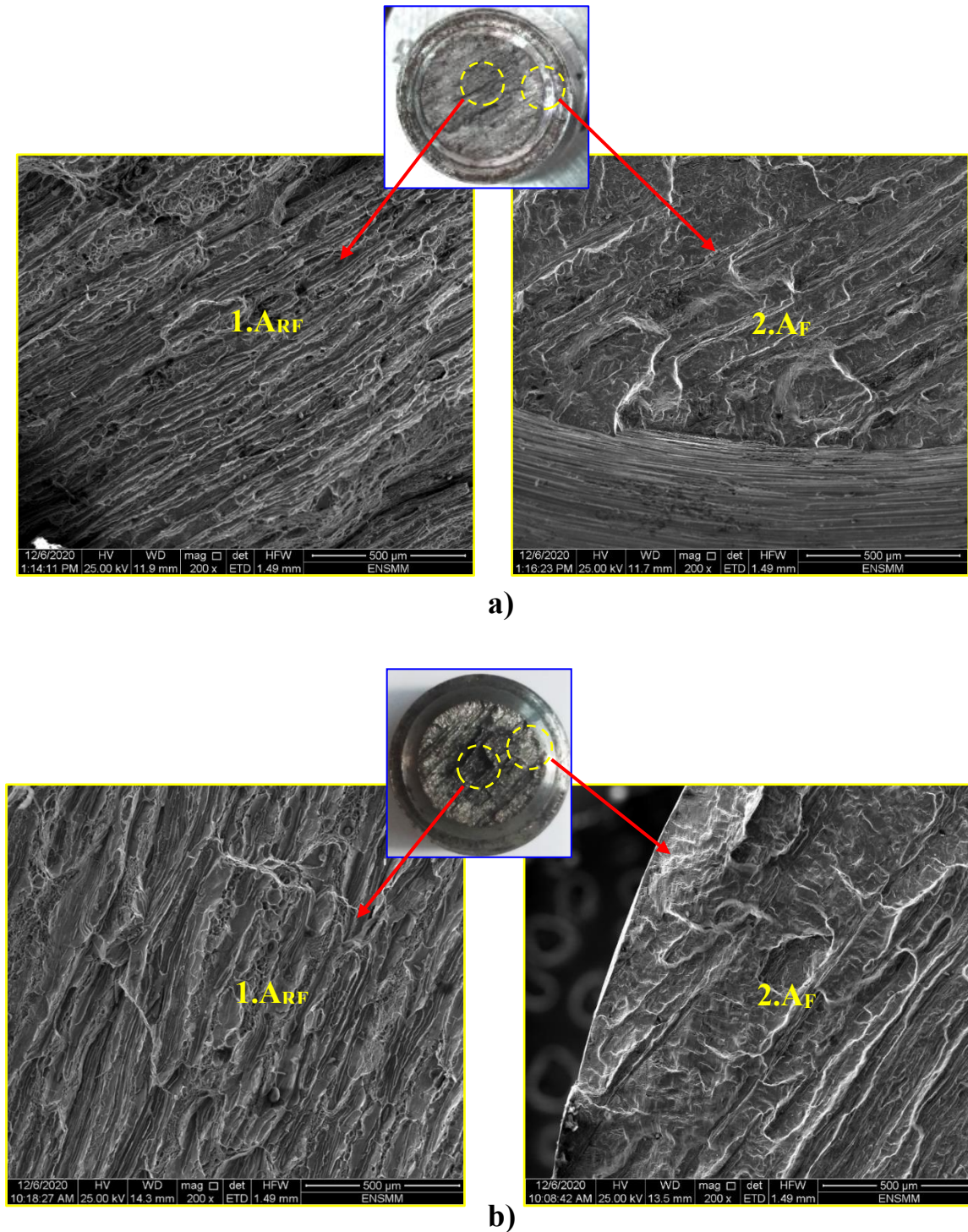
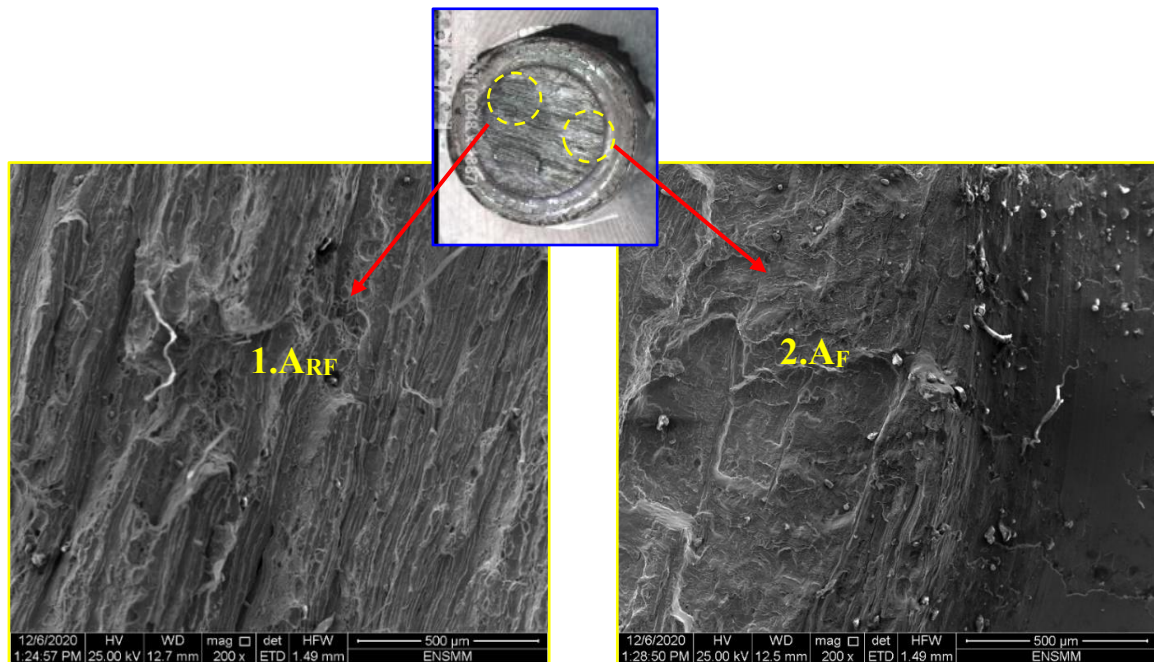


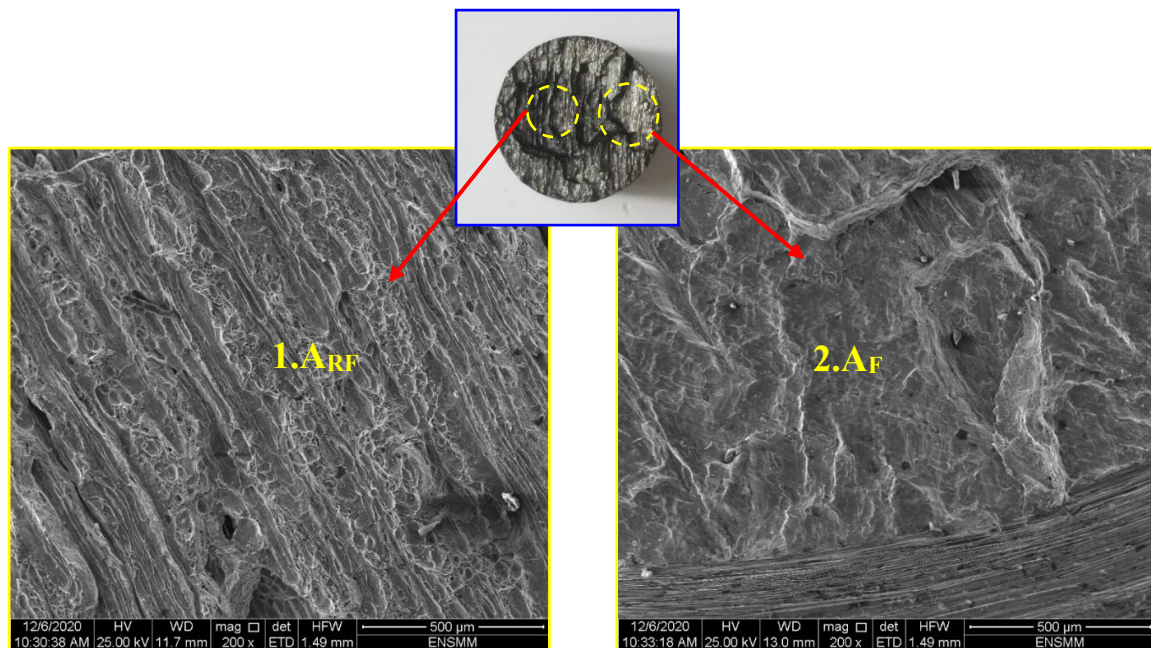
Figure IV.10. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{\max} = 460$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité par SDB.

En testant l'éprouvette dans le domaine de transition ($\sigma_{\max} = 428$ MPa), les clivages observés dans la zone A_{Rf} sont plus prononcés en tournage, avec des rivières de réamorçage plus profondes qu'en brunissage (Voir figure IV.11). Dans la zone A_f des éprouvettes tournées,

les cupules se transforment en cratères, suggérant un amorçage des fissures au sein même du grain du matériau.



a)



b)

Figure IV.11. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{\max} = 428$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité par SDB

Dans le domaine élastique ($\sigma_{\max} = 368$ MPa), un phénomène similaire est observé dans la zone A_{RF} après tournage, bien que les rivières apparaissent plus fines. En revanche, après brunissage, le matériau semble conserver sa ductilité, avec des cupules plus nettes (Voir figure

IV.12). Dans la zone de fissuration (A_F), le clivage reste visible en tournage, avec parfois des creux plus larges et plus profonds (Voir figure IV.12a) que les cupules présentes dans l'état de brunissage (Voir figure IV.12b).

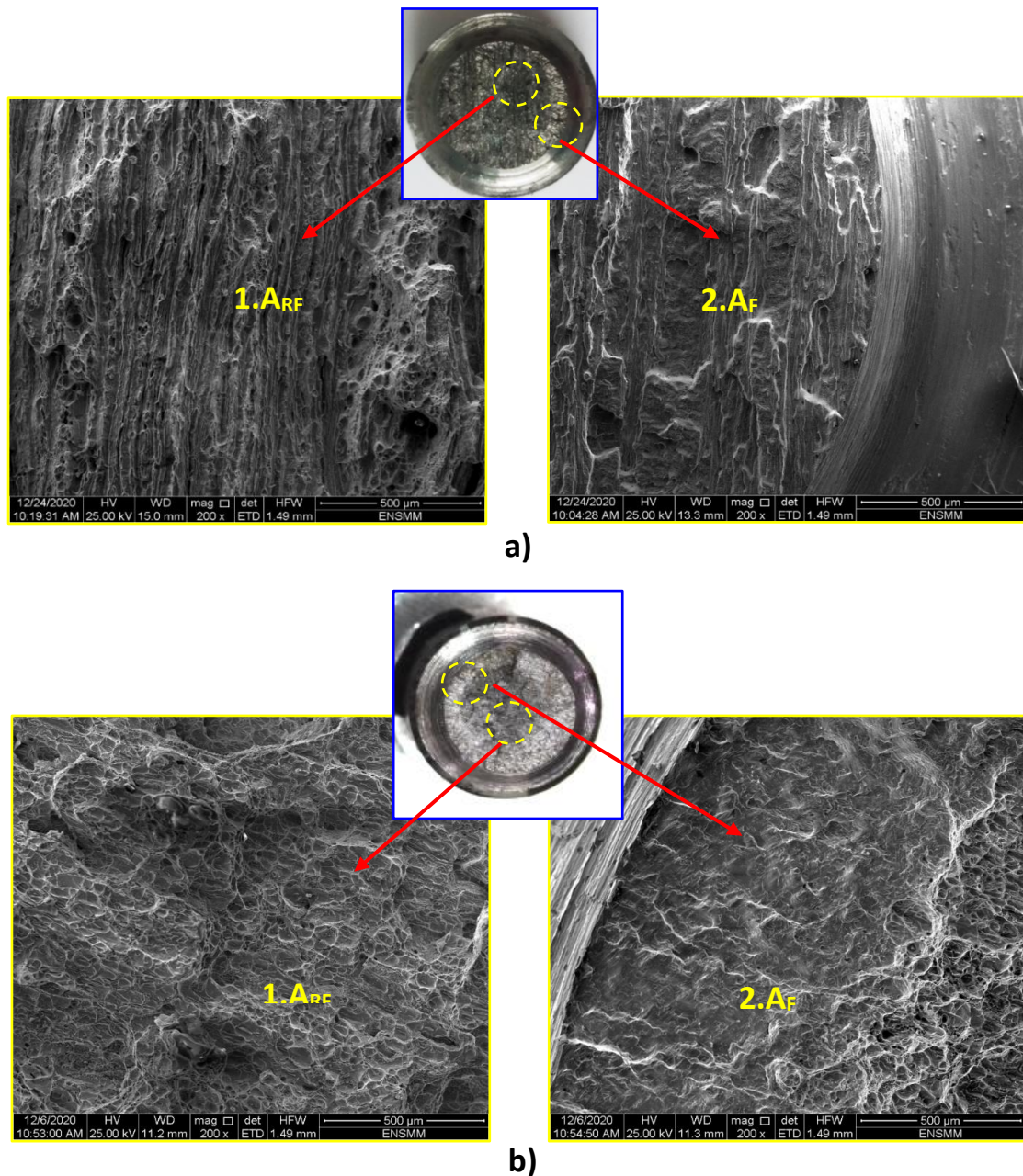
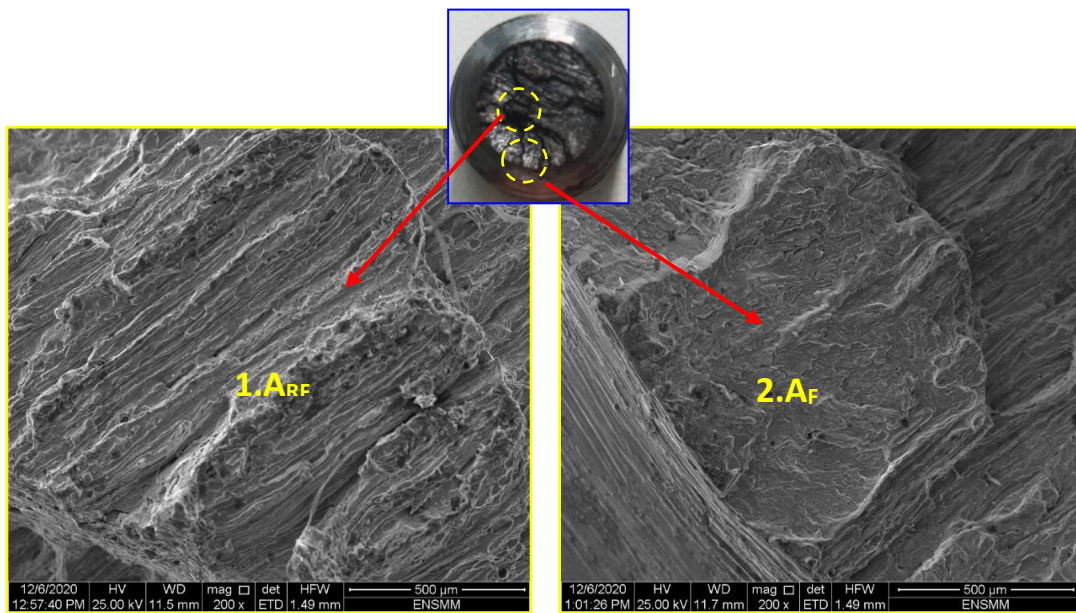


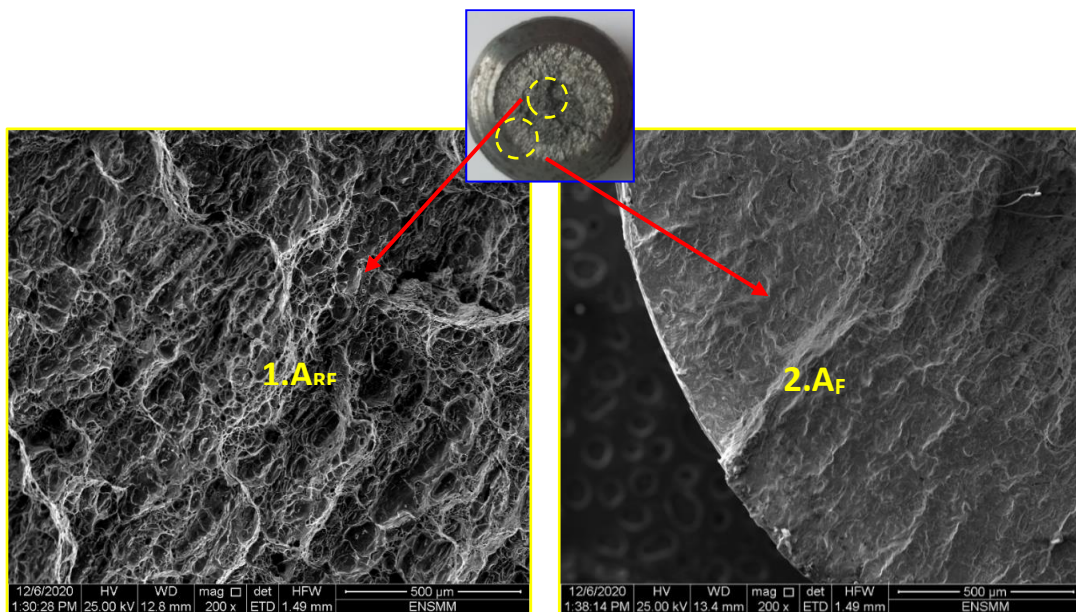
Figure IV.12. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{\max} = 368$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité SDB

Lorsque la contrainte est proche de la limite d'endurance du matériau ($\sigma_{\max} = 200$ MPa), les clivages dans la zone A_{RF} apparaissent plus profonds en tournage, tandis que les cupules observées en brunissage sont allongées et de plus grande taille (Voir figure IV.13). Dans la zone A_F , les éprouvettes tournées présentent plusieurs amorçages de fissures en surface (Voir figure

IV.13a), lesquels convergent vers le centre de la section, divisant la matière en portions triangulaires.



a)



b)

Figure IV.13. Faciès de rupture par fatigue en flexion rotative à $\sigma_{\max} = 200$ MPa de l'acier 100C6 a) tourné et b) traité par SDB

La distinction entre la zone de rupture finale (A_{RF}) et la zone de fissuration (A_F) devient ainsi moins marquée, et la zone de rupture s'observe près du bord de l'éprouvette avec un aspect lisse et soyeux. En revanche, sur les éprouvettes brunies, on note moins de fissures, et celles-ci sont plus fines. La zone de fissuration (A_F) présente une géométrie typique et régulière de la fatigue en flexion rotative (Voir figure IV.13b).

IV.6.1.Évolution des fronts de rupture

Actuellement, les courbes de Wöhler et l'examen fractographique des fronts de rupture sont considérés comme les seules méthodes industriellement applicables pour comparer les chargements admissibles en fonction de la durée de vie des matériaux. Cependant, pour évaluer plus précisément l'impact des conditions de brunissage sur la résistance en fatigue, il est nécessaire d'étudier l'évolution des fronts de rupture après application de ce procédé.

La Figure IV.14 illustre l'évolution de l'aire fissurée pour différentes amplitudes de contrainte. Indépendamment du traitement de mise en œuvre appliqué, plus la contrainte σ_{max} est faible, plus la taille du front A_F est importante. Cet indicateur de ténacité est particulièrement perceptible dans les éprouvettes brunies. Ainsi, le facteur d'intensité de contrainte critique K_{Ic} est plus élevé, ce qui signifie que le matériau montre une plus grande ténacité aux faibles contraintes.

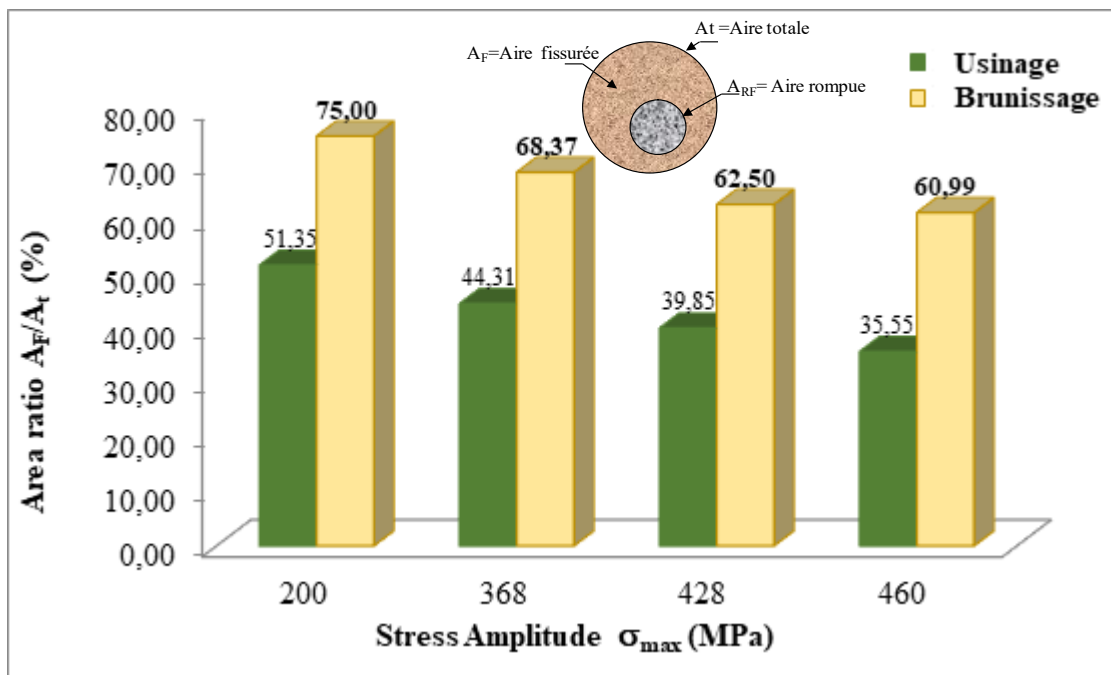


Figure IV.14. Evolution du rapport $((A_F)/A_t)$ en fonction de l'amplitude de contrainte σ_{max} .

En effet, pour tous les chargements σ_{max} testés, le procédé de brunissage aboutit à une aire fissurée A_F plus étendue. Par exemple, dans le domaine élastique (fatigue à grand nombre de cycles), un chargement à $\sigma_{max} = 200$ MPa fait que l'aire fissurée A_F représente jusqu'à 75 % de la section totale A_t des éprouvettes brunies, contre 51,35 % pour les éprouvettes tournées.

La Figure IV.15 illustre le taux d'augmentation de la taille du front final de fissuration (A_F) dû au brunissage. Dans le cas de fatigue à grand nombre de cycles ($\sigma_{max} = 200$ MPa), ce taux d'augmentation est estimé à 23,65 %. En contrepartie, la zone de rupture finale (A_{RF})

n'occupe que 25 % de la section totale de l'éprouvette, indiquant que celle-ci était faiblement chargée et que la fatigue, dans ses deux phases principales (amorçage et propagation), a affecté 75 % de la section avant la rupture finale.

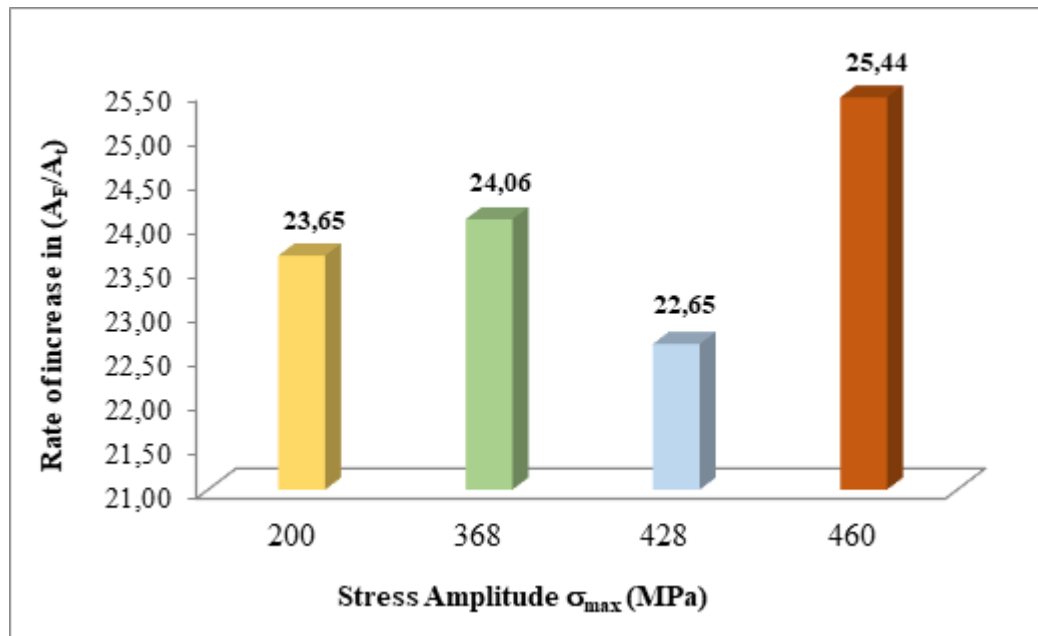


Figure IV.15. Taux d'augmentation du rapport (A_F/A_t) induit par le brunissage.

L'écart le plus faible (22,65 %) a été enregistré lors d'un chargement dans le domaine de transition élastoplastique ($\sigma_{\max} = 428$ MPa), tandis que le meilleur taux d'augmentation (25,44 %) a été observé pour un chargement dans le domaine plastique ($\sigma_{\max} = 460$ MPa). Dans ce domaine, correspondant à un faible nombre de cycles, le brunissage a conduit à une aire fissurée (A_F) de 60,99 %, contre 35,55 % après tournage. Cela montre qu'en générant le front de rupture le plus étendu, le brunissage induit un facteur d'intensité des contraintes élevé, révélant ainsi ses effets positifs sur la ténacité (K_{Ic}) et, par conséquent, sur la résistance en fatigue du matériau.

IV.7. Conclusion

L'analyse réalisée dans ce chapitre a montré l'influence significative du brunissage sur les propriétés mécaniques de l'acier 100C6, notamment sur les contraintes résiduelles et le comportement en fatigue. Ce traitement mécanique a généré un état de compression dans les couches superficielles, retardant ainsi l'amorçage et la propagation des fissures.

- Avant brunissage, les contraintes résiduelles mesurées étaient respectivement de 418 MPa, 419 MPa et 410 MPa pour des charges de 0,5 N, 1 N et 1,5 N. Après brunissage, ces valeurs ont augmenté à 436 MPa (+4,31 %), 432 MPa (+3,10 %) et 433 MPa (+5,61 %). L'effet du brunissage apparaît plus marqué sous des charges élevées, ce qui suggère des modifications structurelles plus importantes à la surface du matériau.

- Les essais de fatigue ont mis en évidence une augmentation notable de la durée de vie des échantillons. En régime de fatigue à grand nombre de cycles, une amélioration de 12,57 % a été observée, tandis qu'en fatigue oligocyclique, l'augmentation maximale a atteint 120 %. Les essais de flexion rotative ont confirmé cette tendance, tandis que l'analyse fractographique a révélé des fronts de fissures plus étendus et des caractéristiques de rupture ductile, comme des cupules allongées, témoignant d'une ténacité accrue des échantillons brunis.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette thèse a exploré de manière approfondie l'influence du brunissage par glissement sur l'intégrité de surface et les propriétés mécaniques des matériaux. Le travail porte sur l'optimisation des paramètres du brunissage pour améliorer des propriétés clés telles que la rugosité, la microdureté, la tenue en fatigue, et les contraintes résiduelles.

Une revue bibliographique sur les traitements mécaniques de surface a mis en évidence leur rôle dans l'amélioration de l'intégrité de surface. Le brunissage par glissement au moyen d'une pointe en diamant a été présenté comme une méthode efficace, grâce à sa capacité à réduire la rugosité, à augmenter la dureté et à introduire des contraintes résiduelles de compression favorisant la résistance à la fatigue de l'acier 100C6.

Les méthodologies expérimentales mises en œuvre ont permis d'étudier l'effet du brunissage sur l'acier 100C6. Les outils, les paramètres expérimentaux et les techniques d'analyse utilisées, comme la méthode de surface de réponse (MSR), ont permis d'évaluer de manière systématique l'influence des paramètres du brunissage. En outre, des essais de fatigue et des analyses des contraintes résiduelles ont contribué à mieux comprendre l'impact de ce traitement sur la durabilité et la performance des composants.

Les résultats expérimentaux ont été analysés pour identifier les effets des paramètres du brunissage sur la rugosité de surface (R_a) et la dureté (HV). L'analyse a montré que la vitesse d'avance et le nombre de passes jouent un rôle dominant dans l'amélioration de ces propriétés, avec une interaction significative entre-eux. Une optimisation multi-objective a permis d'identifier un régime optimal ($i = 3$, $f = 0,074$ mm/tr, $P_y = 10$ kgf), offrant un compromis équilibré entre une rugosité réduite et une dureté accrue.

Les cartes multivariées ont permis de représenter visuellement l'effet combiné des paramètres de brunissage sur la rugosité et la dureté, mettant en évidence les conditions optimales du procédé, notamment une avance de 0,074 mm/tr, trois passes et une force de brunissage de 10 kgf. Ces visualisations valident les tendances identifiées et révèlent les configurations qui offrent les meilleurs résultats en termes de performance. Par ailleurs, l'analyse des contributions montre que l'avance est le paramètre prédominant sur la rugosité avec 79 %, tandis que le nombre de passes domine l'effet sur la dureté avec 46 %. Certaines interactions, comme $i \times f$ et $i \times P_y$, bien que secondaires, exercent une influence notable, respectivement de 4 % sur la rugosité et de 8 % sur la dureté. L'ensemble de ces résultats confirme qu'une optimisation efficace du brunissage nécessite de considérer à la fois les effets directs des paramètres et leurs interactions pour améliorer durablement l'état de surface.

Conclusion générale

Les effets du brunissage sur la tenue en fatigue ont été investigués à travers des essais de flexion rotative. Les résultats ont montré une augmentation significative de la durée de vie en fatigue, en particulier dans le régime oligocyclique, avec un gain allant jusqu'à 120 %. L'analyse fractographique a confirmé que le brunissage modifie les mécanismes de rupture. Par ailleurs, le traitement a induit des contraintes résiduelles de compression, mesurées avant et après brunissage, révélant une augmentation pouvant atteindre jusqu'à 5.30 % sous une charge d'indentation de 1,5N.

Les travaux menés dans cette thèse démontrent que le brunissage par glissement est un traitement mécanique de surface efficace pour améliorer l'intégrité de surface et les propriétés mécaniques des matériaux, notamment de l'acier 100C6. L'optimisation des paramètres de brunissage a permis d'atteindre des performances maximales en termes de rugosité, de dureté et de tenue en fatigue. L'approche expérimentale a renforcé la compréhension des mécanismes essentiels, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'application de ce traitement dans divers secteurs industriels exigeant une durabilité accrue des composants mécaniques.

A ce stade de la recherche, le travail reste ouvert à plusieurs perspectives dont principalement les suivantes :

- Investiguer plus de paramètres de brunissage et leur influence sur l'intégrité de surface pour renforcer davantage la tenue en fatigue.
- Décomposer la durée de vie en fatigue pour distinguer les deux phases, (amorçage et propagation) de la fatigue et cibler la phase la plus sensible au brunissage.
- Envisager une simulation numérique pour plus d'investigation dans l'influence du brunissage sur la vitesse de fissuration lors de la sollicitation en fatigue.

Références

- [1] G. V. Duncheva *et al.*, "Fatigue strength improvement in CuAl8Fe3 bronze via diamond burnishing," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 12, 2021, doi: 10.1007/s40430-021-03296-8.
- [2] V. Chomienne, F. Valiorgue, J. Rech, and C. Verdu, "Influence of ball burnishing on residual stress profile of a 15-5PH stainless steel," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 13, 2016, doi: 10.1016/j.cirpj.2015.12.003.
- [3] O. Taamallah, H. Hamadache, N. Mokas, A. Amirat, and B. Hamadi, "Investigation of the Effects of Slide Diamond Burnishing Process on the Mechanical Performance of GCr15 Steel," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 23, no. 3, 2023, doi: 10.1007/s11668-023-01652-5.
- [4] I. Bobrovskij, N. Bobrovskij, A. Khaimovich, and J. A. Travieso-Rodriguez, "Impacts of Surface Texture and Nature of Friction on Energy-Force Efficiency of Surface Plastic Deformation during Burnishing," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 10, 2022, doi: 10.3390/met12101568.
- [5] J. Zaghal, V. Molnár, and M. Benke, "Improving surface integrity by optimizing slide diamond burnishing parameters after hard turning of 42CrMo4 steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 128, no. 5–6, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12008-6.
- [6] A. Panda, A. K. Sahoo, and A. K. Rout, "Statistical regression modeling and machinability study of hardened AISI 52100 steel using cemented carbide insert," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 8, no. 1, 2017, doi: 10.5267/j.ijiec.2016.7.004.
- [7] A. K. Sahoo and B. Sahoo, "Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-I (An experimental approach)," *Measurement (Lond)*, vol. 46, no. 8, 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2013.03.024.
- [8] R. B. Tere and G. L. Samuel, "EFFECT OF TEXTURED CUTTING INSERTS IN MICRO-TURNING OF Ti-6AL-4V ALLOYS," *Materiali in Tehnologije*, vol. 57, no. 5, 2023, doi: 10.17222/mit.2023.828.
- [9] A. Çiçek, T. Kivak, and E. Ekici, "Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills," *J Intell Manuf*, vol. 26, no. 2, 2015, doi: 10.1007/s10845-013-0783-5.
- [10] J. BOSSON, "Analyse de l'hydrogène dans les aciers," *Étude et propriétés des métaux*, 1993, doi: 10.51257/a-v1-m262.
- [11] M. Durand-Charre, *La microstructure des aciers et des fontes*. EDP Sciences, 2020. doi: 10.1051/978-2-7598-0833-5.
- [12] A. Galtier, O. Bouaziz, and A. Lambert, "Influence de la microstructure des aciers sur leur propriétés mécaniques," *Mécanique et Industries*, vol. 3, no. 5, 2002, doi: 10.1016/S1296-2139(02)01188-0.
- [13] A. Galtier, "Influence de la microstructure des aciers sur leur propriétés mécaniques Influence of steel microstructure on their mechanical properties," *Mécanique & Industries*, 2002, doi: 10.1016/s1296-2139(02)01188-0.
- [14] M. Durand-Charre, *La microstructure des aciers et des fontes*. 2020. doi: 10.1051/978-2-7598-0833-5.

- [15] A. Panda, A. K. Sahoo, R. Kumar, and R. K. Das, "A review on machinability aspects for AISI 52100 bearing steel," in *Materials Today: Proceedings*, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.422.
- [16] C. D. Aquino, L. G. Rodrigues, J. M. Branco, and W. J. S. Gomes, "Statistical correlation investigation of a single-doweled timber-to-timber joint," *Eng Struct*, vol. 269, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114810.
- [17] E. Tan, I. Ovali, A. Mavi, M. Kaplan, and Ş. Okay, "Influence of repeated tempering on the machinability and microstructure of an AISI 52100 steel," *Materialpruefung/Materials Testing*, vol. 57, no. 11–12, 2015, doi: 10.3139/120.110805.
- [18] J. D. Thiele and S. N. Melkote, "Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel," *J Mater Process Technol*, vol. 94, no. 2, 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(99)00111-9.
- [19] K. Bouacha, M. A. Yallese, T. Mabrouki, and J. F. Rigal, "Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool," *Int J Refract Metals Hard Mater*, vol. 28, no. 3, 2010, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2009.11.011.
- [20] I. Meddour, M. A. Yallese, R. Khattabi, M. Elbah, and L. Boulanouar, "Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, no. 5–8, 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6559-z.
- [21] "Machining: fundamentals and recent advances," *Choice Reviews Online*, vol. 46, no. 11, 2009, doi: 10.5860/choice.46-6223.
- [22] V. Schulze, "Characteristics of Surface Layers Produced by Shot Peening," in *Shot Peening*, 2003. doi: 10.1002/3527606580.ch20.
- [23] A. Klink, Y. B. Guo, and F. Klocke, "Surface integrity evolution of powder metallurgical tool steel by main cut and finishing trim cuts in wire-EDM," in *Procedia Engineering*, 2011. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.098.
- [24] H. K. Tonshoff, C. Arendt, and R. Ben Amor, "Cutting of hardened steel," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 49, no. 2, 2000, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63455-6.
- [25] D. Umbrello and L. Filice, "Improving surface integrity in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel by modeling white and dark layers formation," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 58, no. 1, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.106.
- [26] I. Altenberger, "Deep rolling-the past, the present and the future," in *Conf Proc: ICSP*, 2005.
- [27] A. Khellouki, J. Rech, and H. Zahouani, "The effect of abrasive grain's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing," *Wear*, vol. 263, no. 1-6 SPEC. ISS., 2007, doi: 10.1016/j.wear.2006.11.037.
- [28] Prof. G. A. P., "Effect of Burnishing Process on Behavior of Engineering Materials- A Review," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 5, no. 5, 2013, doi: 10.9790/1684-0550920.
- [29] K. Stout *et al.*, "The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions," *EUR(Luxembourg)*, 1993.

- [30] G. Henzold, *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards, Third Edition*. Elsevier, 2020. doi: 10.1016/C2020-0-01081-9.
- [31] B. Griffiths, "Manufacturing Surface Technology. Surface Integrity & Functional Performance," *Penton Press*, p. 253, 2001.
- [32] A. M. Hassan and A. S. Al-Bsharat, "Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals," *Wear*, vol. 199, no. 1, 1996, doi: 10.1016/0043-1648(95)06847-3.
- [33] A. Van Gorp, M. Bigerelle, A. Grellier, A. Iost, and D. Najjar, "A multi-scale approach of roughness measurements: Evaluation of the relevant scale," *Materials Science and Engineering C*, vol. 27, no. 5-8 SPEC. ISS., 2007, doi: 10.1016/j.msec.2006.09.041.
- [34] G. P. Petropoulos, C. N. Pandazaras, and J. P. Davim, "Surface texture characterization and evaluation related to machining," in *Surface Integrity in Machining*, 2010. doi: 10.1007/978-1-84882-874-2_2.
- [35] M. WOYDT, "Application des données tribologiques des matériaux," *Frottement, usure et lubrification*, 2012, doi: 10.51257/a-v2-bm7006.
- [36] D. FRANÇOIS, "Essais mécaniques des métaux - Essais de dureté," *Frottement, usure et lubrification*, 2005, doi: 10.51257/a-v1-m4160.
- [37] D. Saïd, "Etude de l'influence des paramètres tribologiques dans un contact Pion / Disque Procédure expérimentale," *Acma*, no. Figure 1, 2012.
- [38] S. Tiwari and A. Chatterjee, "Basis functions for residual stresses," Jul. 2020, doi: 10.1016/j.amc.2020.125468.
- [39] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress part 1 - Measurement techniques," 2001, *IOM Communications Ltd*. doi: 10.1179/026708301101509980.
- [40] J. GUO, H. FU, B. PAN, and R. KANG, "Recent progress of residual stress measurement methods: A review," Feb. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cja.2019.10.010.
- [41] I. C. Noyan, "Defining Residual Stresses in Thin Film Structures," *Advances in X-ray Analysis*, vol. 35, no. A, pp. 461–473, 1991, doi: 10.1154/s0376030800009149.
- [42] J. LU, "Fatigue des alliages ferreux - Facteurs d'influence," *Fonctions et composants mécaniques*, Jan. 2003, doi: 10.51257/a-v1-bm5043.
- [43] P. J. Withers and H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress part 2 - Nature and origins," 2001. doi: 10.1179/026708301101510087.
- [44] D. Furrer, "RESIDUAL STRESS: BOTH FRIEND AND FOE," *Advanced Materials and Processes*, vol. 178, no. 6, 2020, doi: 10.31399/asm.amp.2020-06.p029.
- [45] P. Van Houtte, K. Van Acker, and J. Root, "Residual Stress Determination in the Cementite and Ferrite Phases of High Carbon Steel," *Texture, Stress, and Microstructure*, vol. 33, no. 1–4, 1999, doi: 10.1155/tsm.33.187.
- [46] K. Tanaka and Y. Akiniwa, "Diffraction measurements of residual macrostress and microstress using X-rays, synchrotron and neutrons," *JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*, vol. 47, no. 3, 2004, doi: 10.1299/jsmea.47.252.

- [47] Y. H. Lee and D. Kwon, "Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters," *Acta Mater*, vol. 52, no. 6, 2004, doi: 10.1016/j.actamat.2003.12.006.
- [48] D. FRANÇOIS, "Lois de comportement des métaux - Élasticité. Viscoélasticité," *Étude et propriétés des métaux*, 2004, doi: 10.51257/a-v1-m4151.
- [49] J. LU and H.-P. LIEURADE, "Concentration de contraintes," *Fonctions et composants mécaniques*, 1998, doi: 10.51257/a-v1-bm5040.
- [50] K. J. Miller, "Materials science perspective of metal fatigue resistance," *Materials Science and Technology*, vol. 9, no. 6, 2012, doi: 10.1179/026708393790172178.
- [51] P. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 85, no. 4, 1963, doi: 10.1115/1.3656900.
- [52] K. J. Miller, "Materials science perspective of metal fatigue resistance," *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, vol. 9, no. 6, 1993, doi: 10.1179/mst.1993.9.6.453.
- [53] M. H. Yoo *et al.*, "SURESH, S. Fatigue of Materials. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.," *Materials*, vol. 15, no. 8, 2022.
- [54] Basquin O, *The exponential law of endurance tests*.
- [55] "The determination of fatigue limits under alternating stress conditions," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 90, no. 620, 1914, doi: 10.1098/rspa.1914.0066.
- [56] D. Novovic, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, W. Voice, and P. Bowen, "The effect of machined topography and integrity on fatigue life," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 44, no. 2–3, pp. 125–134, 2004, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.10.018.
- [57] D. Taylor and M. Clancy, "THE FATIGUE PERFORMANCE OF MACHINED SURFACES," 1991.
- [58] M. R. Bayoumit and A. K. Abdellatif~, "EFFECT OF SURFACE FINISH ON FATIGUE STRENGTH," 1995.
- [59] L. Wagner, "Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 263, no. 2, 1999, doi: 10.1016/s0921-5093(98)01168-x.
- [60] S. Belabend, H. Hamadache, and Q. Phamdonhat, "Enhancing surface properties and corrosion resistance of API 5L X52 steel through orthogonal ball burnishing," *Research on Engineering Structures and Materials*, vol. 10, no. 1, 2024, doi: 10.17515/resm2023.833ma0725.
- [61] T. Ouahiba, H. Hamid, B. Selma, and L. Laouar, "Multi-objective optimization of slide diamond burnishing parameters for enhanced fatigue resistance of AISI 52100 steel," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.1007/s40430-024-05001-x.
- [62] F. L. Li, W. Xia, Z. Y. Zhou, J. Zhao, and Z. Q. Tang, "Analytical prediction and experimental verification of surface roughness during the burnishing process," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 62, pp. 67–75, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.06.001.
- [63] J. T. Maximov, G. V. Dunchева, A. P. Anchev, and M. D. Ichkova, "Slide burnishing—review and prospects," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 1–4, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03881-1.

- [64] R. Jerez-Mesa, G. Gomez-Gras, and J. A. Travieso-Rodriguez, "Surface roughness assessment after different strategy patterns of ultrasonic ball burnishing," in *Procedia Manufacturing*, 2017. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.116.
- [65] W. Qin and D. Y. Zhang, "An ultrasonic elliptical vibration burnishing process for reducing surface roughness," in *Advanced Materials Research*, 2011, pp. 3103–3108. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3103.
- [66] H. P. Pathade *et al.*, "A Review on Surface Integrity of Ball Burnishing Process," *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2022, doi: 10.55248/gengpi.2022.3.10.3.
- [67] J. Maximov and G. Duncheva, "The Correlation between Surface Integrity and Operating Behaviour of Slide Burnished Components—A Review and Prospects," 2023. doi: 10.3390/app13053313.
- [68] J. T. Maximov, G. V. Duncheva, A. P. Anchev, N. Ganev, I. M. Amudjev, and V. P. Dunchev, "Effect of slide burnishing method on the surface integrity of AISI 316Ti chromium–nickel steel," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 4, Apr. 2018, doi: 10.1007/s40430-018-1135-3.
- [69] I. S. Jawahir *et al.*, "Cryogenic manufacturing processes," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.007.
- [70] S. Belabend, H. Hamadache, O. Taamallah, and N. Mokas, "Impact of burnishing techniques on corrosion resistance in pipeline materials," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Apr. 2025, doi: DOI:10.1007/s00170-025-15605-9.
- [71] P. Jurči and I. Dlouhý, "Cryogenic Treatment of Martensitic Steels: Microstructural Fundamentals and Implications for Mechanical Properties and Wear and Corrosion Performance," 2024. doi: 10.3390/ma17030548.
- [72] A. Asadbeygi, H. Rezaei, and A. J. Aghchai, "EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE EFFECT OF BURNISHING PROCESS PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS AND HARDNESS OF AL 2036," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2023. doi: 10.1115/IMECE2023-111731.
- [73] H. TANAKA, W. ISHII, and K. YANAGI, "Optimal Burnishing Conditions and Mechanical Properties of Surface Layer by Surface Modification Effect Induced of Applying Burnishing Process to Stainless Steel and Aluminum Alloy," *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, vol. 52, no. 605, 2011, doi: 10.9773/sosei.52.726.
- [74] B. Huang, Y. Kaynak, Y. Sun, M. K. Khraisheh, and I. S. Jawahir, "Surface Layer Modification by Cryogenic Burnishing of Al 7050- T7451 Alloy With Near Ultra-Fine Grained Structure," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 144, no. 3, 2022, doi: 10.1115/1.4051786.
- [75] Harish, D. Shivalingappa, N. Raghavendra, and V. Ganesh, "Impact of Ball Burnishing Process on Residual stress distribution in Aluminium 2024 Alloy using Experimental and Numerical Simulation," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1189, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1189/1/012002.
- [76] R. Jerez Mesa, "Study and characterisation of surface integrity modification after ultrasonic vibration-assisted ball burnishing." [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02061706>

- [77] H. Livatyali, E. Has, and M. Türköz, "Prediction of residual stresses in ball burnishing Ti6AL4V thin sheets," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, no. 3–4, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05837-2.
- [78] X. Shen, X. Gong, J. Zhang, and G. Su, "An investigation of stress condition in vibration-assisted burnishing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, no. 1–4, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04128-9.
- [79] S. Swirad, "Surface Texture Analysis after Hydrostatic Burnishing on X38CrMoV5-1 Steel," *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 32, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s10033-019-0407-x.
- [80] A. Saldaña-Robles, H. Plascencia-Mora, E. Aguilera-Gómez, A. Saldaña-Robles, A. Marquez-Herrera, and J. A. Diosdado-De la Peña, "Influence of ball-burnishing on roughness, hardness and corrosion resistance of AISI 1045 steel," *Surf Coat Technol*, vol. 339, 2018, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.02.013.
- [81] R. Avilés, J. Albizuri, A. Rodríguez, and L. N. López De Lacalle, "Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel," *Int J Fatigue*, vol. 55, 2013, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2013.06.024.
- [82] K. Zay, E. Maawad, H. G. Brokmeier, L. Wagner, and C. Genzel, "Influence of mechanical surface treatments on the high cycle fatigue performance of TIMETAL 54M," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 6, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2010.12.064.
- [83] J. T. Maximov, A. P. Anchev, G. V. Duncheva, N. Ganev, and K. F. Selimov, "Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminum alloys," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, no. 8, pp. 3067–3078, Aug. 2017, doi: 10.1007/s40430-016-0647-y.
- [84] F. Gharbi, S. Sghaier, F. Morel, and T. Benameur, "Experimental Investigation of the Effect of Burnishing Force on Service Properties of AISI 1010 Steel Plates," *J Mater Eng Perform*, vol. 24, no. 2, 2015, doi: 10.1007/s11665-014-1349-1.
- [85] V. Kuznetsov, I. Smolin, A. Skorobogatov, and A. Akhmetov, "Finite Element Simulation and Experimental Investigation of Nanostructuring Burnishing AISI 52100 Steel Using an Inclined Flat Cylindrical Tool," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 9, 2023, doi: 10.3390/app13095324.
- [86] R. Jerez-Mesa, J. Llumà, and J. A. Travieso-Rodríguez, "Vibration-Assisted Ball Burnishing," *Encyclopedia*, vol. 1, no. 2, pp. 460–471, Jun. 2021, doi: 10.3390/encyclopedia1020038.
- [87] R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodríguez, G. Gomez-Gras, and J. Llumà-Fuentes, "Development, characterization and test of an ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool," *J Mater Process Technol*, vol. 257, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.036.
- [88] R. L. Murthy and B. Kotiveerachari, "Burnishing of metallic surfaces - a review," *Precis Eng*, vol. 3, no. 3, 1981, doi: 10.1016/0141-6359(81)90010-6.
- [89] A. Skoczylas and M. Kłonica, "Selected Properties of the Surface Layer of C45 Steel Samples after Slide Burnishing," *Materials*, vol. 16, no. 19, 2023, doi: 10.3390/ma16196513.
- [90] A. Skoczylas and K. Zaleski, "Study on the Surface Layer Properties and Fatigue Life of a Workpiece Machined by Centrifugal Shot Peening and Burnishing," *Materials*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/ma15196677.

- [91] J. T. Maximov, A. P. Anchev, G. V. Duncheva, N. Ganey, K. F. Selimov, and V. P. Dunchev, "Impact of slide diamond burnishing additional parameters on fatigue behaviour of 2024-T3 Al alloy," *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 42, no. 1, 2019, doi: 10.1111/ffe.12915.
- [92] H. Basak, M. T. Ozkan, and I. Toktas, "Experimental research and ANN modeling on the impact of the ball burnishing process on the mechanical properties of 5083 Al-Mg material," *Kovove Materialy*, vol. 57, no. 1, pp. 61–74, 2019, doi: 10.4149/km_2019_1_61.
- [93] G. Rotella, S. Rinaldi, and L. Filice, "Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 1–2, pp. 431–440, Jan. 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04631-z.
- [94] P. Kasuriya, M. Jin, and U. Thanasuptawee, "Automatic Process by Turning and Single Roller Burnishing Process on 6063 Al Alloy: Optimization and Implementation," in *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 2023. doi: 10.3233/ATDE230928.
- [95] J. A. Travieso-Rodríguez, R. Jerez-Mesa, G. Gómez-Gras, J. Llumà-Fuentes, O. Casadesús-Farràs, and M. Madueño-Guerrero, "Hardening effect and fatigue behavior enhancement through ball burnishing on AISI 1038," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.032.
- [96] G. D. Revankar, R. Shetty, S. S. Rao, and V. N. Gaitonde, "Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy," *Measurement (Lond)*, vol. 58, pp. 256–268, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.measurement.2014.08.043.
- [97] M. Okada, S. Terada, Y. Kataoka, T. Kihara, T. Miura, and M. Otsu, "Burnishing characteristics of sliding burnishing process with active rotary tool targeting stainless steel," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, vol. 15, no. 4, 2021, doi: 10.1299/jamdsm.2021jamdsm0044.
- [98] J. Líska, K. Líska, and J. Kodácsy, "Hard Cutting and Diamond burnishing of 100Cr6 steel bearings," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 169–175. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.169.
- [99] H. Hamadache, L. Laouar, N. E. Zeghib, and K. Chaoui, "Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing," *J Mater Process Technol*, vol. 180, no. 1–3, pp. 130–136, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.05.013.
- [100] K. S. Rababa and M. M. Al-Mahasne, "Effect of roller burnishing on the mechanical behavior and surface quality of O1 alloy steel," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 227–233, 2011.
- [101] A. Basu *et al.*, "Laser surface hardening of austempered (bainitic) ball bearing steel," *Scr Mater*, vol. 56, no. 10, pp. 887–890, May 2007, doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.01.029.
- [102] R. O. Vaishya *et al.*, "Mathematical Modeling and Experimental Validation of Surface Roughness in Ball Burnishing Process," *Coatings*, vol. 12, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/coatings12101506.
- [103] J. T. Maximov, A. P. Anchev, G. V. Duncheva, N. Ganey, and K. F. Selimov, "Influence of the process parameters on the surface roughness, micro-hardness, and residual stresses in slide burnishing of high-strength aluminum alloys," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39, no. 8, 2017, doi: 10.1007/s40430-016-0647-y.

- [104] Harish and D. Shivalingappa, "The influence of ball and roller burnishing process parameters on surface integrity of al 2024 alloy," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2020, pp. 1337–1340. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.614.
- [105] B. Sachin, C. M. Rao, G. M. Naik, and N. P. Puneet, "Influence of slide burnishing process on the surface characteristics of precipitation hardenable steel," *SN Appl Sci*, vol. 3, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04260-w.
- [106] H. Kato, W. Hirokawa, Y. Todaka, and K. Yasunaga, "Improvement in Surface Roughness and Hardness for Carbon Steel by Slide Burnishing Process," *Materials Sciences and Applications*, vol. 12, no. 05, pp. 171–181, 2021, doi: 10.4236/msa.2021.125011.
- [107] F. J. Shiou and C. C. Hsu, "Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre," *J Mater Process Technol*, vol. 205, no. 1–3, pp. 249–258, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.244.
- [108] H. Hamadache, A. Amirat, and K. Chaoui, "Effect of diamond ball burnishing on surface characteristics and fatigue strength of XC55 steel," *International Review of Civil Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 156–164, Nov. 2016, doi: 10.15866/irece.v6i6.8201.
- [109] P. Senthil Kumar, B. Sridhar Babu, and V. Sugumaran, "Comparative modeling on surface roughness for roller burnishing process, using fuzzy logic," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, vol. 8, no. 1, 2018, doi: 10.24247/ijmpedfeb20186.
- [110] C. Y. Seemikeri, P. K. Brahmanekar, and S. B. Mahagaonkar, "Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool," *Tribol Int*, vol. 41, no. 8, 2008, doi: 10.1016/j.triboint.2008.01.003.
- [111] K. A. Prasad and M. R. S. John, "Optimization of external roller burnishing process on magnesium silicon carbide metal matrix composite using response surface methodology," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.1007/s40430-021-03069-3.
- [112] N. Jouini, P. Revel, and G. Thoquenne, "Investigation of Surface Integrity Induced by Various Finishing Processes of AISI 52100 Bearing Rings," *Materials*, vol. 15, no. 10, 2022, doi: 10.3390/ma15103710.
- [113] G. J. G. Upton, "Applied multivariate data analysis, volume 1: regression and experimental design, by J.D. Jobson. Pp 621. DM 118. 1991. ISBN 3-540-97660-4 (Springer)," *The Mathematical Gazette*, vol. 78, no. 481, 1994, doi: 10.2307/3619472.
- [114] D.D. PALCHEV, *Traitement de finition et de durcissement par déformations Plastiques superficielles*. Moscou, 1978.
- [115] J. GOUPY, "Modélisation par les plans d'expériences," *Instrumentation et méthodes de mesure*, 2016, doi: 10.51257/a-v2-r275.
- [116] D. C. Montgomery, "Montgomery: Design and Analysis of Experiments," 2017.
- [117] D. Bartoněk, M. Négyesi, and B. Strnadel, "EVALUATION OF RESIDUAL STRESS AND TENSILE PROPERTIES OF RAILWAY AXLE USING INSTRUMENTED INDENTATION METHOD," in *Powder Metallurgy Progress*, 2023. doi: 10.2478/pmp-2022-0003.

- [118] J. G. Swadener, B. Taljat, and G. M. Pharr, "Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters," 2014. [Online]. Available: <http://journals.cambridge.org>
- [119] W. C. Oliver and G. M. Pharr, "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," *J Mater Res*, vol. 7, no. 6, 1992, doi: 10.1557/jmr.1992.1564.